



**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**DESAIN DAN SIMULASI SISTEM POMPA AIR SEL SURYA  
DENGAN OPTIMASI KONTROL SLIP UNTUK  
MEMAKSIMALKAN DAYA DAN EFISIENSI**

Abbrevia Al Jihad Fahiswara  
NRP 2210100199

Dosen Pembimbing  
Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.  
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015



***FINAL PROJECT - TE 141599***

***DESIGN AND SIMULATION SYSTEM SOLAR CELL  
POWERED WATER PUMP WITH SLIP CONTROL  
OPTIMIZATION TO MAXIMUM POWER AND EFFICIENCY***

Abbrevia Al Jihad Fahiswara  
NRP 2210100199

*Advisor*

Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.  
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institut of Technology  
Surabaya 2015

**DESAIN DAN SIMULASI SISTEM POMPA AIR SEL  
SURYA DENGAN OPTIMASI KONTROL SLIP UNTUK  
MEMAKSIMALKAN DAYA DAN EFISIENSI**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

**Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Jurusan Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**

**Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.**

**Heri Suryatmojo, ST., MT., Ph.D.**

**NIP. 1965 10 12 1990 03 1003**

**NIP. 1980 06 03 2006 04 1003**



**SURABAYA  
JANUARI, 2015**

# DESAIN DAN SIMULASI SISTEM POMPA AIR SEL SURYA DENGAN OPTIMASI KONTROL SLIP UNTUK MEMAKSIMALKAN DAYA DAN EFISIENSI

Abbrevia Al Jihad F  
2210100199

Dosen Pembimbing 1 : Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.

Dosen Pembimbing 2 : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

## ABSTRAK

Motor induksi tiga fasa adalah salah satu peralatan listrik yang banyak digunakan baik di industri maupun rumah tangga, salah satu aplikasinya yaitu untuk pompa air. Pada tugas akhir ini didesain dan dirancang sistem pompa air motor induksi tiga fasa dengan sumber tenaga sel surya tanpa menggunakan baterai. Intensitas radiasi matahari yang berubah-ubah sepanjang waktu mengakibatkan daya dan tegangan yang dihasilkan sel surya menjadi naik turun. Bila sel surya tersebut dihubungkan dengan beban seperti motor induksi akan mengakibatkan daya keluaran sel surya tidak optimum, sehingga menyebabkan efisiensi daya keluaran sel surya terhadap daya maksimum rendah. Untuk menjaga agar sel surya selalu menghasilkan daya yang tinggi maka diperlukan suatu kontrol MPPT(*maximum power point tracking*).

Dalam tugas akhir ini dilakukan studi untuk kontrol slip motor induksi dengan metode V/f konstan untuk menjaga agar efisiensi motor selalu tinggi. Sel surya dilengkapi dengan kontrol MPPT metode tegangan keluaran PV konstan untuk memaksimalkan daya keluaran PV. Motor yang digunakan adalah sebesar 1,5 HP dan daya sumber PV sama dengan daya motor sebesar 1140 Watt. Hasil simulasi pada berbagai kondisi radiasi, menunjukkan bahwa dengan adanya kontrol MPPT menghasilkan debit air rata-rata lebih banyak yaitu 29,57 liter/menit. Sedangkan sistem tanpa adanya kontrol MPPT hanya mampu menghasilkan debit air rata-rata sebesar 24,4 liter/menit.

**Kata kunci :** *photovoltaic* (PV), MPPT, kontrol V/f motor induksi, pompa sentrifugal, debit air.





# **DESIGN AND SIMULATION SYSTEM SOLAR CELL POWERED WATER PUMP WITH SLIP CONTROL OPTIMIZATION TO MAXIMUM POWER AND EFFICIENCY**

Abbrevia Al Jihad F  
2210100199

*1<sup>st</sup> Advisor* : Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.  
*2<sup>nd</sup> Advisor* : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

## **ABSTRACT**

*Three phase induction motor is one of the electrical equipment which is widely used both in industry and households, one of the application is to pump the water. In this final water pump system designed three phase induction motor with a solar cell power source without using the battery. The intensity of solar radiation that is changing all the time resulting in power and voltage produced by the solar cells up and down. When the solar cell is connected to a load such as induction motors will result the power output of solar cells is not optimum, thereby causing the efficiency of the solar cell output power to the maximum power is low. To keep the solar cells always produce a high power it require control MPPT (maximum power point tracking).*

*In this final project do a study to slip control induction motors with constant  $V/f$  methods to keep the motor efficiency is always high. The solar cell is equipped with MPPT control method PV output voltage constant to maximize power output of PV. Motor used is 1.5 HP and PV power source is equal to motor power of 1140 Watts. Simulation results on various conditions of radiation, showed that with the MPPT control the flow of water produces an average more that 29,57 liters / min. While the system without MPPT control can only produce an average 24,4 liters / minute*

**Keyword** : photovoltaic (PV), MPPT,  $V/f$  control, induction motor, centrifugal pump, flow rate.



## KATA PENGANTAR

Puji sukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul :

### **Desain dan Simulasi Sistem Pompa Air Sel Surya dengan Optimasi Kontrol Slip Untuk Memaksimalkan Daya dan Efisiensi**

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar sarjana pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Keluarga yang telah banyak memberikan dorongan dan doa untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng. dan Bapak Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D., selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran serta bimbingan.
3. Bapak Dr. Tri Arief Sardjono, ST, MT. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro ITS, serta Bapak Ir. Teguh Yuwono selaku Koordinator Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga.
4. Seluruh dosen pengajar Jurusan Teknik Elektro ITS yang telah banyak memberi ilmu selama penulis menempuh kuliah.
5. Rekan-rekan mahasiswa Jurusan Teknik Elektro ITS, yang telah memberikan doa dan semangat.
6. Beastudi Etos Dompot Dhuafa yang telah memberikan beasiswa dan pembinaan selama 3 tahun.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini belum sempurna, oleh karena itu saran dan masukan sangat diharapkan untuk perbaikan di masa yang akan datang. Semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi pembaca dan masyarakat pada umumnya.

Surabaya, Desember 2014

Penulis





# DAFTAR ISI

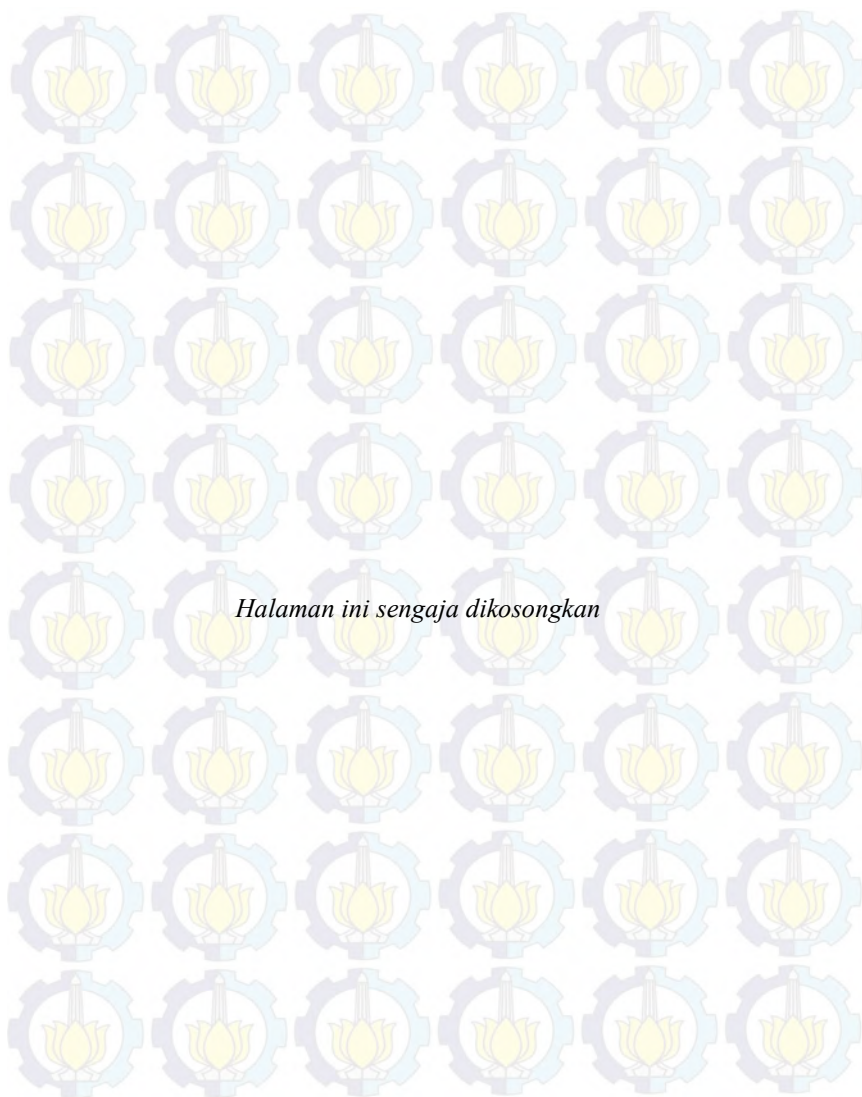
<b>HALAMAN JUDUL</b>	
<b>LEMBAR PERNYATAAN</b>	
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b>	
<b>ABSTRAK</b>	i
<b>ABSTRACT</b>	iii
<b>KATA PENGANTAR</b>	iv
<b>DAFTAR ISI</b>	vii
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	ix
<b>DAFTAR TABEL</b>	xi
<b>DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN</b>	xiii
<b>BAB 1      PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Metodologi	2
1.5 Sistematika Penulisan	3
1.6 Relevansi	4
<b>BAB 2      TEORI PENUNJANG</b>	
2.1 Sel Surya (PV)	5
2.2 <i>Buck-Boost Converter</i>	7
2.3 Kontroler	10
2.3.1 Kontroler Proportional	10
2.3.1 Kontroler Integral	11
2.4 Inverter Tiga Fasa	12
2.4.1 Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)	14
2.5 Motor Induksi Tiga Fasa	16
2.5.1 Konstruksi Motor Induksi Tiga Fasa	17
2.5.2 Prinsip Kerja Motor Induksi Tiga Fasa	18
2.5.3 Frekuensi dan slip Motor	19
2.5.3 Rangkaian Ekuivalensi Motor Induksi	19
2.6 Slip Kontrol dengan V-f Konstan	21
2.7 Pompa Sentrifugal	22
2.7.1 Bagian-Bagian Utama Pompa Sentrifugal	24

<b>BAB 3</b>	<b>DESAIN SISTEM POMPA AIR SEL SURYA BERBASIS MPPT DAN V/F KONTROL</b>	
3.1	Pemodelan Sistem .....	27
3.2	Panel Surya .....	28
3.3	Desain <i>buck</i> Konverter .....	30
3.3.1	Rangkaian <i>Buck</i> Konverter .....	30
3.4	Desain MPPT Teknik Tegangan Tetap .....	33
3.5	Inverter Tiga Fasa .....	35
3.6	Motor induksi tiga Fasa .....	36
3.7	Kontrol V/f Konstan .....	37
3.8	Pompa Sentrifugal .....	39
3.9	Pemodelan Seluruh Sistem .....	41
<b>BAB 4</b>	<b>SIMULASI SISTEM DAN ANALISIS DATA</b>	
4.1	Simulasi Karakteristik V-I dan P-I Sistem Tanpa MPPT dan Sistem Menggunakan MPPT .....	44
4.1.1	Simulasi Karakteristik (V-I) dan (V-P) Sistem Tanpa MPPT .....	45
4.1.2	Simulasi Karakteristik (V-I) dan (V-P) Sistem Menggunakan MPPT .....	47
4.2	Simulasi Keseluruhan Sistem dengan Menggunakan Kontrol MPPT dan Tanpa Menggunakan Kontrol MPPT .....	48
4.2.1	Hasil Simulasi Panel Surya .....	49
4.2.2	Hasil Simulasi Motor Induksi .....	52
4.2.3	Hasil Simulasi Pompa Air Sentrifugal .....	56
<b>BAB 5</b>	<b>PENUTUP</b>	
5.1	Kesimpulan .....	59
5.2	Saran .....	59
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>61</b>
<b>DAFTAR RIWAYAT HIDUP .....</b>		<b>63</b>

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Pensaklaran Inverter 3 Fasa metode konduksi .....	13
Tabel 3.1	Parameter Panel Surya BPSSX-60.....	29
Tabel 3.2	Jumlah Panel Surya BPSSX-60 yang dibutuhkan.....	29
Tabel 3.3	Perbandingan daya Maksimum PV dengan daya PV dengan MPPT .....	34
Tabel 3.4	Parameter Motor Induksi Tiga Fasa.....	36
Tabel 3.5	Parameter Pompa Sentrifugal .....	40
Tabel 4.1	Hasil Simulasi Sistem dengan Kontrol MPPT dengan tanpa kontrol MPPT.....	57





## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Sebuah potongan sel surya (PV) .....	5
Gambar 2.2	PV Modul yang Terdiri dari Sel Surya yang Disusun Paralel 4 modul dan Sel Surya yang Disusun Seri 2 modul.....	6
Gambar 2.3	Grafik tegangan dan arus PV .....	6
Gambar 2.4	Sel Surya Dihubungkan Seri dan Paralel .....	7
Gambar 2.5	Buck konverter.....	8
Gambar 2.6	Topologi standar inverter 3 fasa.....	13
Gambar 2.7	Tegangan output inverter 3 fasa metode konduksi ..	14
Gambar 2.8	Gelombang Sinyal Ideal SPWM 3 Fasa.....	15
Gambar 2.9	Penampang stator dan rotor motor induksi .....	17
Gambar 2.10	Komponen Stator Motor Induksi 3 Fasa .....	18
Gambar 2.11	Rangkaian ekivalen motor induksi.....	20
Gambar 2.12	Karakteristik V – F pada kontrol V/F konstan .....	21
Gambar 2.13	Karakteristik torsi-kecepatan pada berbagai nilai tegangan dan frekuensi .....	22
Gambar 2.14	Motor dan pompa sentrifugal.....	23
Gambar 2.15	Rumah pompa sentrifugal .....	24
Gambar 3.1	Pemodelan sederhana sistem.....	28
Gambar 3.2	karakteristik panel surya .....	30
Gambar 3.3	Pemodelan buck konverter.....	31
Gambar 3.4	Pemodelan sistem kontrol MPPT.....	33
Gambar 3.5	Karakteristik PV dengan dan tanpa MPPT .....	34
Gambar 3.6	Pemodelan inverter tiga fasa .....	35
Gambar 3.7	Pemodelan SPWM.....	36
Gambar 3.8	Karakteristik motor induksi 3 fasa sumber 220 V L-L frekuensi 50 Hz.....	37
Gambar 3.9	Karakteristik motor induksi pada tegangan dan frekuensi dengan rasio konstan .....	38
Gambar 3.10	Pemodelan kontrol V/f konstan .....	38
Gambar 3.11	Karakteristik kecepatan-torsi pompa sentrifugal .....	39
Gambar 3.12	Karakteristik kecepatan-debit pompa sentrifugal.....	40
Gambar 3.13	Karakteristik Motor-Pompa .....	41
Gambar 3.14	Pemodelan seluruh sistem .....	42
Gambar 4.1	Pemodelan sederhana seluruh sistem.....	44
Gambar 4.2	Karakteristik (V-I) sel surya dan motor-pompa tanpa menggunakan MPPT .....	46

Gambar 4.3	Karakteristik (V-P) sel surya dan motor-pompa tanpa menggunakan MPPT .....	46
Gambar 4.4	Karakteristik (V-I) sel surya dan motor-pompa dengan menggunakan kontrol MPPT .....	47
Gambar 4.5	Karakteristik (V-P) sel surya dan motor-pompa dengan menggunakan kontrol MPPT .....	48
Gambar 4.6	Level intensitas cahaya matahari untuk simulasi ....	49
Gambar 4.7	Karakteristik Daya dan Efisiensi daya keluaran PV terhadap daya maksimum PV .....	50
Gambar 4.8	Karakteristik tegangan dan arus keluaran PV .....	52
Gambar 4.9	Karakteristik Daya masukan motor, tegangan keluaran Konverter DC, dan Frekuensi Motor .....	53
Gambar 4.10	Karakteristik Kecepatan dan Torsi Motor induksi .	54
Gambar 4.11	karakteristik Slip motor Induksi .....	55
Gambar 4.12	Karakteristik Debit air dan volume air .....	56

## DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN

PID	: <i>Proportional Integral Differential</i>
PV	: Photovoltaik
Rpm	: Rotasi permenit
Nm	: meter
MPPT	: <i>Maximum Power Point Tracking</i>
SPWM	: <i>Sinusoidal Pulse Width Modulation</i>
V/f	: Rasio tegangan terhadap frekuensi
S	: Slip
N	: Jumlah lilitan
$V_{dc}$	: Tegangan DC
$V_{rms}$	: Tegangan RMS keluaran <i>line to line</i> inverter
$V_L$	: Tegangan Induktor
$V_s$	: Tegangan Sumber
$V_o$	: Tegangan Keluaran
R	: Resistor
L	: Induktor
C	: Kapasitor
$jX$	: Reaktansi
$I_M$	: Arus Magnetisasi (Ampere)
$f$	: Frekuensi
$i_L$	: Arus Induktor
D	: <i>Duty cycle</i>
T	: Periode
$V_{ab1}$	: Tegangan fundamental keluaran <i>line to line</i> inverter
$m_a$	: Perbandingan antara amplitudo sinyal modulasi dengan amplitudo sinyal <i>carrier</i>
$V_i$	: Tegangan masukan inverter
H	: Henry
F	: Farad
PLN	: Perusahaan Listrik Negara
$K_p$	: Konstanta Proporsional
$K_i$	: Konstanta Integrator
Kd	: Konstanta Differensial





## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hughes Austi, *“Electric Motor and Drive Fundamentals, types and Application, Third Edition”*, Elsevier Ltd, 2006.
- [2] Rashid, Muhammad H., *“Power Electronics Handbook”*, Academic Press, USA, 2007.
- [3] Hart, Daniel W., *“Power Electronics”*, McGraw-Hill, USA, 2011.
- [4] Peralatan Energi Listrik, *“Pompa dan Sistem Pemompaan”*, UNEP, 2006.
- [5] M.A Vitorino, M.B.R Correa, C.B Jacobina dan A.M.N Lima, *“An Effective Induction Motor Control for Photovoltaic Pumping”*, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol.58, No. 4, April 2011.
- [6] X. Ruan, B. Li, Qianhong Chen, Siew-Chong Tan, Chi K. Tse *“Fundamental considerations of three-level DC–DC converters: topologies, analyses, and control”*, IEEE transactions on circuits and systems, vol. 11, no. 55, dec. 2008.
- [7] T. Esmar., P. L. Chapman., *“Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques”*, IEEE Trans. Energy Convers., vol. 22, pp. 439-449, jun. 2008.
- [8] P.C. Krause, *“Analysis of Electric Machinery and Drive System, 2<sup>nd</sup>”*, IEEE Press , Bab 14, 2002.
- [9] The NCB/NCBZ Series features a bareshaft end-suction Centrifugal Pumps, SAER PUMPS.
- [10] Kurniawan, Aris Pratama, *“Optimalisasi Sel Surya Menggunakan Maximum Power Point Tracker (MPPT) Sebagai Catu Daya Base Transceiver Station (BTS)”* Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro ITS, Mei, 2010..
- [11] Mohammed Ali Elgendy, Bashar Zahawi, David John Atkinson *“Comparison of Directly Connected and Constant Voltage Controlled Photovoltaic Pumping Systems”* ,IEEE transactions on sustainable energy, vol. 1, no. 3, october 2010.

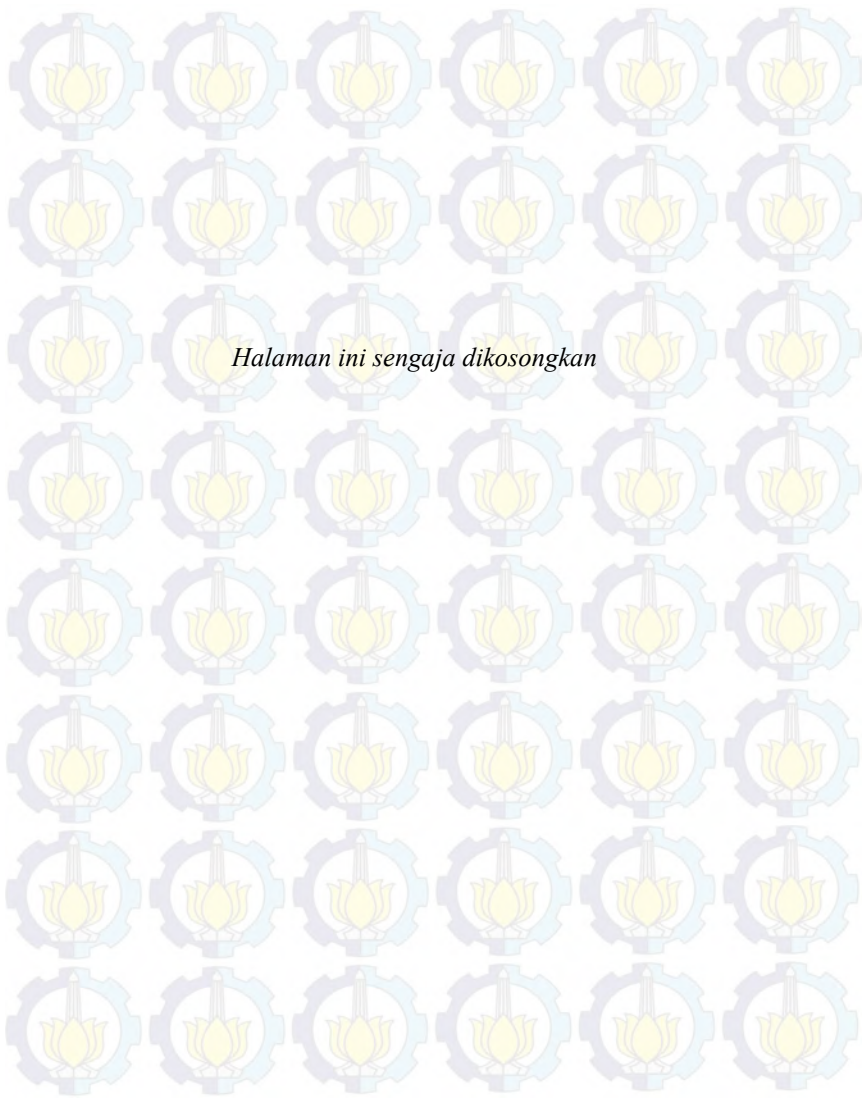


## RIWAYAT HIDUP PENULIS



**Abbrevia Al Jihad Fahiswara** dilahirkan di Jombang, tanggal 4 Oktober 1990. Penulis adalah putra pertama dari pasangan Abdul Kowa dan Eni Su'istifa. Penulis memulai jenjang pendidikan di SDN Sidokare II Sidoarjo, SMPN 1 Ngimbang, SMAN 3 Jombang hingga lulus di tahun 2009. Pada tahun 2010 penulis melanjutkan pendidikan ke di Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada Jurusan Teknik Elektro, dengan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga Listrik. Penulis merupakan salah satu penerima Beasiswa Etos Wilayah Surabaya, semasa kuliah penulis aktif sebagai pengurus Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro. Berbagai karya tulis telah dihasilkan penulis pada program kreatifitas mahasiswa. Selain itu penulis juga aktif menjadi pengurus program pemberdayaan masyarakat.





# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

Indonesia merupakan negara agraris yang memiliki lahan pertanian yang luas. Tanaman dapat tumbuh dan berkembang dengan baik diperlukan air yang cukup. Saat musim kemarau curah hujan di Indonesia sedikit sekali, Sehingga sistem pengairan lahan dilakukan dengan menggunakan pompa air. Untuk daerah yang dekat dengan sumber listrik PLN (Perusahaan Listrik Negara) dapat menggunakan pompa air listrik, sedangkan untuk daerah yang jauh dari sumber listrik PLN para petani menggunakan pompa air dari tenaga diesel. Pompa air yang menggunakan tenaga dari diesel membutuhkan bahan bakar fosil berupa minyak yang harganya sangat mahal dan meningkat relatif tajam pertahunnya, sehingga biaya yang dibutuhkan untuk pengairan lahan pertanian sangat besar. Bahan bakar fosil sendiri akan menghasilkan polusi udara berupa gas karbondioksida yang besar serta keserdiannya ketersediannya juga terbatas dan lama kelamaan akan semakin berkurang dan habis, oleh karena itu diperlukan sumber energi listrik lain yang ramah lingkungan dan dapat diperbaharui.

Salah satu sumber energi terbarukan dan ramah lingkungan adalah sel surya. Sel surya berfungsi mengkonversi energi dari radiasi matahari yang kemudian menghasilkan energi listrik, sehingga tidak ada biaya untuk bahan bakarnya. Harga sel surya tiap tahunnya mengalami penurunan yang dikarenakan maraknya penggunaan sel surya untuk kebutuhan sumber energi manusia. Indonesia merupakan Negara tropis dengan tingkat radiasi yang tinggi, sehingga cocok sekali menggunakan sel surya sebagai sumber energi terbarukan.

cara menggerakkan pompa air dapat menggunakan motor induksi 3 fasa. Pemilihan motor induksi sebagai penggerak karena memiliki beberapa keunggulan. Keunggulan motor induksi adalah konstruksinya yang kuat, tidak ada kontak antara stator dan rotor kecuali bearing, tenaga yang besar, daya listrik rendah, hampir tidak ada perawatan dan harga yang relatif murah. Salah satu aplikasi motor induksi yang sangat menjanjikan adalah sebagai penggerak pompa air.

Pada tugas akhir ini akan dipaparkan proses energi listrik dari sel surya dengan tingkat radiasi yang berbeda beda dapat menggerakkan motor induksi 3 fasa dengan menggunakan *maximum power point*

*tracking* (MPPT) untuk memaksimalkan efisiensi sel surya serta mengontrol slip motor induksi dengan cara mengubah nilai tegangan dan frekuensinya sehingga dapat memaksimalkan daya dan efisiensi motor dan pompa.

## 1.2 Permasalahan

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah bagaimana mengontrol MPPT agar efisiensi sel surya dapat maksimum dan mengontrol slip optimal dengan cara mengubah level tegangan dan frekuensi pada nilai tertentu untuk sehingga efisiensi motor akan tinggi pada berbagai intensitas sinar matahari, sehingga diperoleh hasil output daya dan efisiensi yang maksimum serta menghasilkan debit air yang maksimal dari sistem pompa air tenaga sel surya.

## 1.3 Tujuan

Tugas Akhir ini memiliki tujuan sebagai berikut :

1. Memaksimalkan daya dan efisiensi sel surya dengan menggunakan MPPT dengan teknik tegangan keluaran sel surya tetap.
2. Meningkatkan efisiensi motor induksi 3 fasa pada pompa air tenaga *photovoltaic* dengan mengoptimalkan tegangan dan frekuensi motor induksi pada nilai tertentu yang mengakibatkan perubahan slip.
3. Merancang suatu sistem pompa air tenaga sel surya dengan penggerak berupa motor induksi 3 fasa.

## 1.4 Metodologi

Metode penyelesaian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Studi Literatur  
Mempelajari referensi-referensi yang berkaitan dengan *photovoltaic*, MPPT, elektronika daya(buck converter dan inverter 3 fasa), dan motor induksi standar-standar dan parameter dari jurnal, buku-buku, dan internet.
2. Pemodelan dan Simulasi  
Setelah mendapatkan literatur yang menunjang, penulis akan memodelkan dalam bentuk simulasi menggunakan software PSIM. Pemodelan terdiri dari dari PV, buck converter, inverter 3 fasa DC(searah)-AC(bolak-balik), motor induksi dan pompa



sentrifugal. Semua pemodelan dari komponen dilakukan dengan program Psim.

3. Analisa data

Dari simulasi akan diperoleh suatu hasil yang nantinya akan dianalisis. Data yang akan dianalisis adalah hasil output daya dan efisiensi PV dan motor sehingga diperoleh teknik kontrol yang optimum pada berbagai kondisi radiasi sel surya yang akan mempengaruhi keluaran debit dan volume air yang dipompakan.

4. Pembuatan Laporan Tugas Akhir

Penulisan laporan dilakukan sebagai penggambaran kesimpulan dari Tugas Akhir ini. Kesimpulan tersebut merupakan jawaban dari permasalahan yang dianalisis. Selain itu juga akan diberikan saran sebagai masukan berkaitan dengan apa yang telah dilakukan

### 1.5 Sistematika Penulisan

Tugas Akhir ini dibagi dalam lima bab dengan sistematika sebagai berikut :

Sistematika penulisan laporan Tugas Akhir ini ibagi menjadi lima bab dengan masing-masing bab diuraikan sebagai berikut:

1. BAB 1 merupakan pendahuluan yang berisi latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi.
2. BAB 2 berisi teori penunjang yang membahas tentang sel surya (*photovoltaic*), *buck converter*, *Inverter*, Motor Induksi, pompa sentrifugal dan strategi kontrol MPPT sel surya dengan teknik tegangan keluaran PV tetap dan kontrol motor Induksi dengan mengubah level tegangan dan frekuensi pada nilai tertentu yang nantinya akan mengubah slip sehingga diperoleh daya dan efisiensi PV dan motor yang optimal.
3. BAB 3 berisi tentang uraian perencanaan dan pembuatan simulasi pemodelan untuk tiap komponen serta penentuan parameter untuk setiap komponen.
4. BAB 4 berisi tentang hasil Simulasi dan analisis terhadap simulasi yang dilakukan.
5. BAB 5 berisi tentang kesimpulan dan saran-saran.



## 1.6 Relevansi

Manfaat yang dapat diperoleh dari hasil penulisan Tugas Akhir ini adalah :

1. Dapat membantu para petani untuk menghemat biaya operasional pertanian.
2. Dapat menjadi referensi bagi masyarakat umum untuk mengatasi kelangkaan energi
3. Dapat menjadi referensi bagi peneliti selanjutnya untuk mendapatkan debit air yang optimal dari sebuah pompa tenaga surya.
4. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang hendak mengambil masalah yang serupa untuk Tugas Akhirnya.

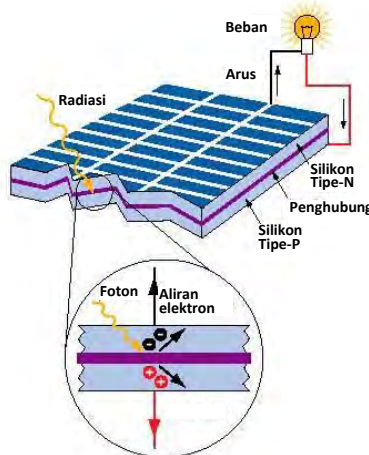
## BAB II

### TEORI PENUNJANG

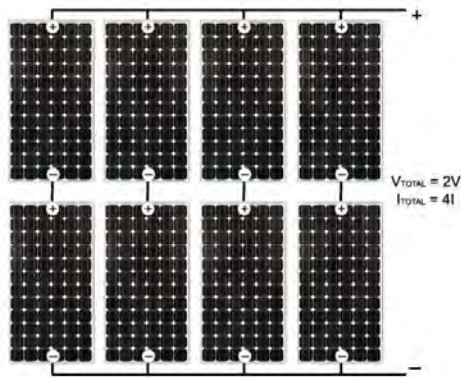
#### 2.1 Sel Surya (PV)

Sel surya atau biasa disebut PV adalah salah satu sumber energi listrik terbarukan yang memanfaatkan sumber energi dari radiasi sinar matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik. PV merupakan sumber energi yang ramah lingkungan dan sangat menjanjikan pada masa yang akan datang. Tidak ada polusi yang dihasilkan selama proses konversi energi dan berlimpahnya sumber energi matahari adalah alasan mengapa PV mulai berkembang pesat dewasa ini.

PV terdiri dari minimal 2 lapisan semi-konduktor. Satu lapisan yang mengandung muatan positif, muatan yang lain negatif. Sinar matahari terdiri dari partikel kecil dari energi matahari yang disebut foton. Saat PV terkena sinar matahari banyak dari foton yang tercermin, menembus, atau diserap oleh sel surya. Ketika foton yang diserap oleh lapisan negatif dari PV sudah mencukupi, elektron dibebaskan dari bahan semikonduktor negatif. Elektron ini dibebaskan secara alami bermigrasi ke lapisan positif menciptakan suatu tegangan yang berbeda [1]. Ketika 2 lapisan yang terhubung ke beban eksternal, elektron mengalir melalui sirkuit menciptakan listrik.

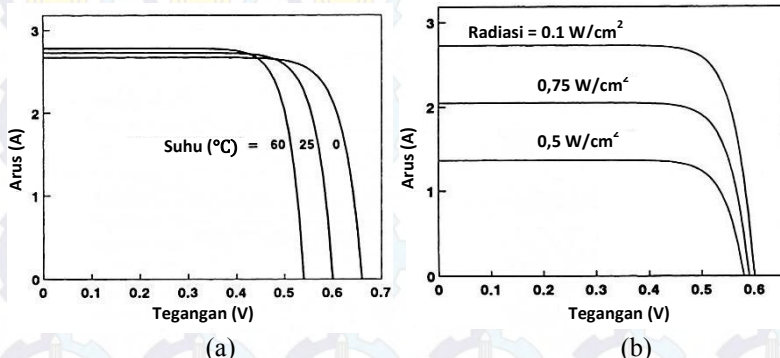


**Gambar 2.1** Sebuah potongan sel surya (PV)



**Gambar 2.2** PV Modul yang Terdiri dari Sel Surya yang Disusun Paralel 4 modul dan Sel Surya yang Disusun Seri 2 modul

Karakteristik besarnya tegangan dan arus yang dapat dikeluarkan oleh PV bergantung pada besarnya intensitas cahaya yang mengenai permukaan PV dan suhu pada permukaan PV, gambar berikut menunjukkan pengaruh besarnya intensitas cahaya matahari dan suhu pada PV.

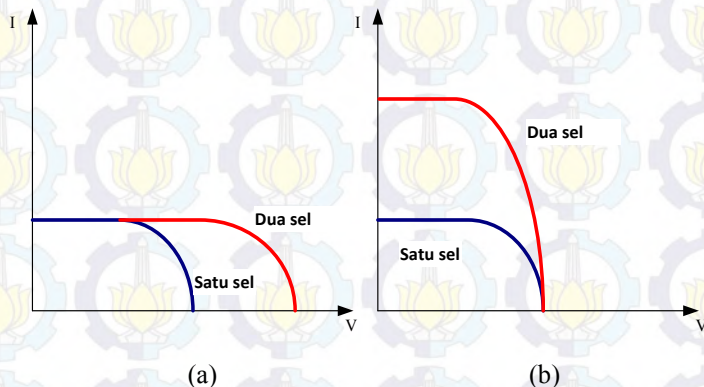


**Gambar 2.3** Grafik tegangan dan arus PV pada: (a) intensitas suhu yang berbeda dan (b) intensitas radiasi yang berbeda.

Untuk meningkatkan output daya, Sel PV digabungkan dalam paket yang disebut modul PV. Modul-modul ini kemudian dihubungkan

secara serial dan / atau paralel satu sama lain, ke dalam apa yang disebut *array* PV untuk menciptakan tegangan yang diinginkan dan arus keluaran yang diperlukan. Ilustrasi penggambaran dari rangkaian seri-paralel modul PV adalah seperti pada Gambar 2.2, sedangkan kurva I-V PV diilustrasikan pada Gambar 2.3.

Untuk mendapatkan daya yang lebih besar dapat dilakukan pemasangan secara seri atau paralel pada modul PV. Jika dipasang secara seri akan meningkatkan tegangan keluaran PV dan jika dipasang secara paralel maka akan meningkatkan arus keluaran pada PV, seperti terlihat pada gambar 2.4.

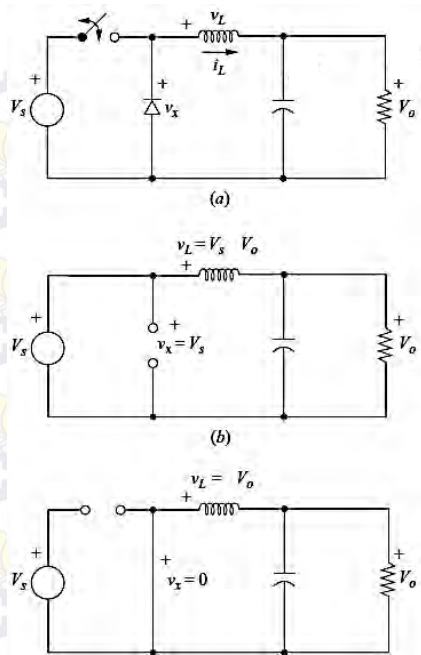


**Gambar 2.4** Sel Surya Dihubungkan Seri (a) dan Paralel (b)

## 2.2 Buck Konverter

Buck konverter adalah salah satu peralatan elektronik yang dapat menaikkan dan menurunkan tegangan arus searah. Besar tegangan keluaran dapat diatur dengan mengatur siklus waktu pensaklaran transistor atau MOSFET.





**Gambar 2-5** Buck konverter. (a) Circuit;  
(b) Rangkaian ekuivalen untuk saklar tertutup;  
(c) Rangkaian ekuivalen untuk saklar terbuka[3]

#### **Analisa ketika saklar tertutup :**

Ketika saklar tertutup, tegangan yang melewati induktor adalah :

$$V_L = V_s - V_o = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L}$$

Kecepatan perubahan arus pada induktor bersifat konstan, ini menunjukkan peningkatan yang linier. Jadi persamaannya dapat dinyatakan seperti :

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s - V_o}{L}$$

Sehingga  $\Delta i_L$  ketika saklar tertutup :

$$(\Delta i_L)_{closed} = \frac{(V_s - V_o)DT}{L} \quad (2.1)$$

**Analisa ketika saklar terbuka :**

Ketika saklar terbuka, sumber  $V_s$  tidak mengalirkan arus. Sehingga induktor yang menyimpan arus akan mengalirkannya ke kapasitor dan beban, arus di induktro akan:

$$V_L = -V_o = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_o}{L}$$

Karena perubahan arus induktor konstan maka perubahan arusnya :

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_o}{L}$$

Sehingga  $\Delta i_L$ ,

$$(\Delta i_L)_{open} = -\frac{V_o(1-D)T}{L} \quad (2.2)$$

Untuk keadaan steady state, perubahan arus induktor dalam satu periode harus lebih besar dari nol. Dengan menggunakan persamaan (2.1) dan (2.2).

$$(\Delta i_L)_{closed} + (\Delta i_L)_{open} = 0$$

$$\frac{(V_s - V_o)DT}{L} - \frac{V_o(1-D)T}{L} = 0$$

$$V_0 = V_s D \quad (2.3)$$

Agar arus bersifat *continuous*, maka arus induktor harus tetap positif. Untuk menentukan batas antara arus kontinyu atau terputus-putus, maka besar induktor :

$$L_{min} = \left( \frac{(1-D)R}{2f} \right) \quad (2.4)$$

Riak tegangan dapat dihitung dengan mengetahui besar kapasitansi

$$\Delta V_0 = \frac{TV_0(1-D)T}{8CL} = \frac{V_0(1-D)}{8LCf^2}$$

$$\frac{\Delta V_0}{V_0} = \frac{1-D}{8LCf^2} \quad (2.5)$$

$$C = \frac{(1-D)}{8L(\Delta V/V_0)f^2} \quad (2.6)$$

## 2.3 Kontroler

Kontroler merupakan suatu sistem yang berfungsi agar keluaran sistem memiliki nilai yang sama dengan masukan yang diberikan. Kontroler pada umumnya terdiri dari proporsional, integral, dan differensial.

### 2.3.1 Kontroler Proporsional

Untuk kontroler proporsional, sinyal kesalahan  $e(t)$  merupakan masukan kontroler sedangkan keluaran kontroler adalah sinyal kontrol  $u(t)$ . Secara lebih sederhana dapat dikatakan bahwa keluaran kontroler proporsional merupakan perkalian antara konstanta proporsional dengan masukannya. Hubungan antara masukan kontroler  $e(t)$  dan keluaran kontroler  $u(t)$  seperti pada Persamaan 2.7

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (2.7)$$

$K_p$  adalah penguatan proporsional

Sehingga fungsi alih kontroler proporsional dalam bentuk *laplace* adalah

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (2.8)$$

Apapun mekanismenya dan apapun bentuk gaya operasinya, kontroler proporsional pada dasarnya merupakan suatu penguat dengan penguatan yang dapat diatur.

Kontroler proporsional memiliki dua parameter, pita proporsional (proporsional *band*) dan konstanta proporsional. Daerah kerja kontroler efektif dicerminkan oleh pita proporsional, sedangkan konstanta proporsional menunjukkan nilai faktor penguat terhadap sinyal kesalahan ( $K_p$ ).

Ciri-ciri kontroler proporsional harus diperhatikan ketika kontroler tersebut diterapkan pada suatu sistem. Secara eksperimen, penggunaan kontroler proporsional harus memperhatikan ketentuan-ketentuan berikut :

1. Jika nilai  $K_p$  kecil, kontroler proporsional hanya mampu melakukan koreksi kesalahan yang kecil, sehingga akan menghasilkan respon sistem yang lambat.
2. Jika nilai  $K_p$  dinaikkan, respon sistem menunjukkan semakin cepat mencapai keadaan yang diinginkan, akan tetapi jika nilai dari  $K_p$  diperbesar hingga mencapai harga yang berlebihan, akan mengakibatkan sistem bekerja tidak stabil.

### 2.3.2 Kontroler Integral

Untuk kontroler integral, sinyal kesalahan  $e(t)$  merupakan masukan kontroler sedangkan keluaran kontroler adalah sinyal kontrol  $u(t)$ . Pada kontroler integral nilai masukan kontroler  $u(t)$  diubah pada laju proporsional dari sinyal kesalahan  $e(t)$  sehingga hubungan antara masukan kontroler  $e(t)$  dan keluaran kontroler  $u(t)$  ditunjukkan pada Persamaan 2.9



$$u(t) = Ki \int_0^t e(t) dt \quad (2.9)$$

Dalam bentuk laplace Persamaan 2.10 menjadi :

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (2.10)$$

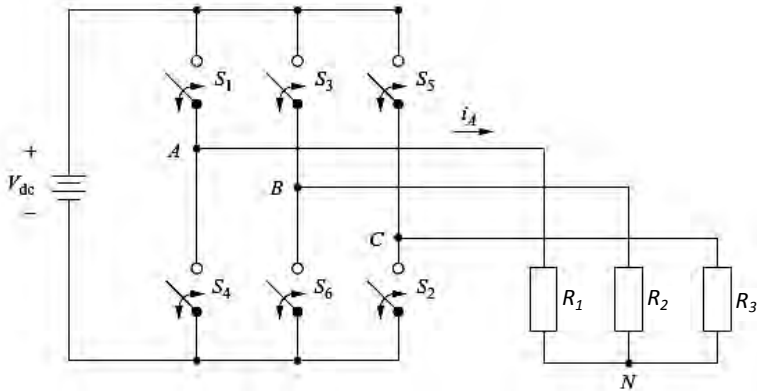
$K_i$  adalah konstanta integral yang nilainya dapat diubah-ubah. Kontroler integral berfungsi menghasilkan respon sistem yang memiliki kesalahan keadaan mendekati nol. Jika sebuah *plant* tidak memiliki unsur integrator ( $1/s$ ), kontroler proporsional tidak akan mampu menjamin keluaran sistem dengan kesalahan keadaan nol. Keluaran kontroler ini merupakan jumlahan yang terus menerus dari perubahan masukannya. Jika sinyal kesalahan tidak mengalami perubahan, keluaran akan menjaga keadaan seperti sebelum terjadinya perubahan masukan. Sinyal keluaran kontroler integral merupakan luas bidang-bidang yang dibentuk oleh kurva kesalahan penggerak. Sinyal keluaran akan berharga sama dengan harga sebelumnya ketika sinyal kesalahan berharga nol. Ketika menggunakan kontroler integral mempunyai beberapa karakteristik berikut ini :

1. Keluaran kontroler membutuhkan selang waktu tertentu, sehingga kontroler integral cenderung memperlambat respon.
2. Ketika sinyal kesalahan berharga nol, keluaran kontroler akan bertahan pada nilai sebelumnya.
3. Jika sinyal kesalahan tidak berharga nol, keluaran akan menunjukkan kenaikan atau penurunan yang dipengaruhi oleh besarnya sinyal kesalahan dan nilai  $K_i$ .

## 2.4 Inverter Tiga Fasa

Inverter merupakan peralatan elektronik yang dapat mengubah listrik arus searah menjadi listrik arus bolak-balik. Listrik arus bolak-balik yang dihasilkan dapat diatur tegangan maupun frekuensinya dengan menggunakan transformator, peralatan saklar dan rangkaian kontrol[1]. Aplikasi inverter yang saat ini banyak digunakan antara lain untuk mengubah tegangan dari sumber listrik arus searah seperti baterai atau sel surya agar menjadi tegangan listrik arus bolak-balik, kemudian

tegangan tersebut disuntikkan ke sistem. Secara umum terdapat dua macam inverter berdasarkan sinyal keluaran yang dihasilkan, yaitu sinyal sinus modifikasi dan sinyal sinus murni. Topologi standar dari inverter 3 fasa dapat dilihat pada Gambar 2.6 sedangkan kondisi pensaklaran yang valid dapat dilihat pada Tabel 2.1



**Gambar 2.6** Topologi standar inverter 3 fasa [3]

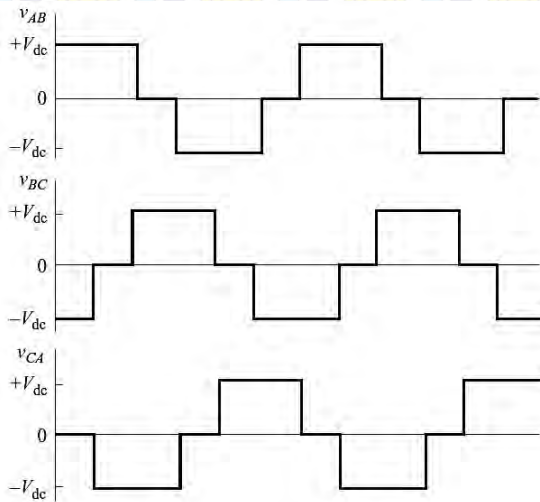
Gambar 2.6 di atas menunjukkan bahwa topologi standar inverter 3 fasa terdiri dari enam saklar yang dapat dikendalikan. Setiap fasa tersusun atas dua buah saklar. Dengan demikian arus yang dialirkan pada setiap fasa dapat diatur.

**Tabel 2.1** Pensaklaran Inverter 3 Fasa metode konduksi[3]

No.	Kondisi	Vab	Vbc	Vca
1	$S_1, S_5, S_6$ on $S_2, S_3, S_4$ off	$V_{dc}$	$-V_{dc}$	0
2	$S_1, S_2, S_6$ on $S_3, S_4, S_5$ off	$V_{dc}$	0	$-V_{dc}$
3	$S_1, S_2, S_3$ on $S_4, S_5, S_6$ off	0	$V_{dc}$	$-V_{dc}$
4	$S_2, S_3, S_4$ on $S_1, S_5, S_6$ off	$-V_{dc}$	$V_{dc}$	0
5	$S_3, S_4, S_5$ on $S_1, S_2, S_6$ off	$-V_{dc}$	0	$V_{dc}$
6	$S_4, S_5, S_6$ on $S_1, S_2, S_3$ off	0	$-V_{dc}$	$V_{dc}$
7	$S_1, S_3, S_5$ on $S_4, S_6, S_2$ off	0	0	0
8	$S_4, S_6, S_2$ on $S_1, S_3, S_5$ off	0	0	0

Tabel 2.1 menunjukkan bahwa saklar-saklar yang terletak pada satu kaki ( $S_1$  dan  $S_4$ ,  $S_3$  dan  $S_6$ ,  $S_5$  dan  $S_2$ ) tidak boleh ditutup secara bersamaan karena akan membuat rangkaian menjadi terhubung singkat. Saklar-saklar yang terletak pada satu kaki juga tidak boleh dibuka secara bersamaan karena akan menyebabkan inverter menghasilkan sinyal keluaran yang tidak terdefinisi [2].

Di antara delapan kondisi pensaklaran yang valid pada Tabel 2.1 di atas, dua di antaranya (kondisi 7 dan 8) menghasilkan tegangan 0 V sedangkan enam kondisi lainnya tidak. Tegangan keluaran yang mungkin dihasilkan oleh inverter adalah  $V_{dc}$ , 0 dan  $-V_{dc}$ . Untuk menghasilkan sinyal tegangan keluaran yang diharapkan, perlu dilakukan pemilihan kondisi yang dapat dicapai dengan teknik modulasi.

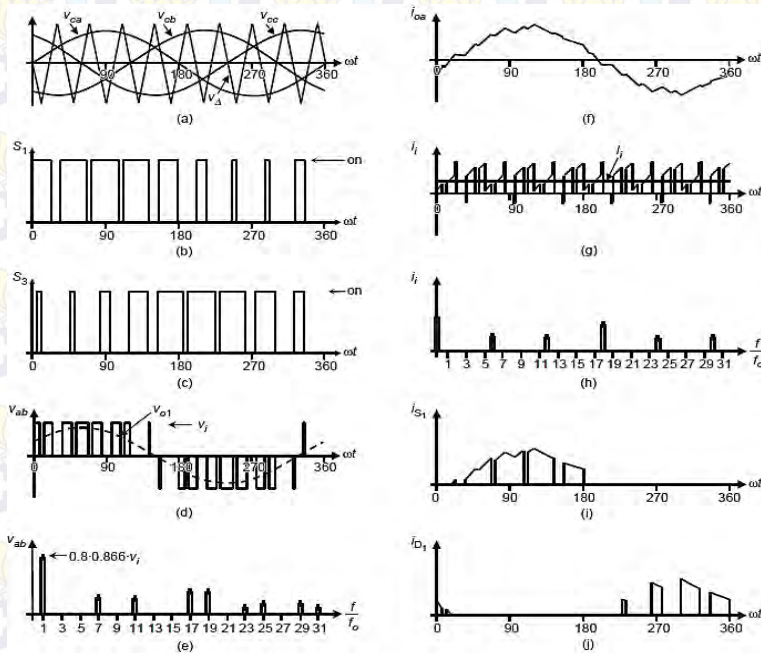


**Gambar 2.7** Tegangan output inverter 3 fasa metode konduksi[3]

#### 2.4.1 Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)

Untuk menghasilkan tegangan pada beban dengan beda fasa  $120^\circ$ , digunakan sinyal modulasi yang mempunyai beda fasa  $120^\circ$ . Gambar 2.8 di bawah menunjukkan gelombang sinyal ideal dari SPWM 3 fasa. Gambar 2.8 menunjukkan prinsip kerja dari sinusoidal PWM. Prinsip kerja sinusoidal PWM adalah dengan membandingkan antara tiga sinyal modulasi sinusoidal yang berbeda fasa  $120^\circ$  dengan sinyal *carrier* yang berupa sinyal segitiga dengan frekuensi tinggi.

Amplitudo sinyal modulasi harus lebih kecil atau maksimal sama dengan amplitudo sinyal segitiga. Nilai ketiga sinyal modulasi tersebut dibandingkan dengan nilai sinyal segitiga dengan menggunakan komparator. Ketika nilai sinyal modulasi lebih tinggi daripada sinyal segitiga, komparator akan mengeluarkan sinyal *on*. Sedangkan ketika nilai sinyal modulasi lebih rendah dibandingkan sinyal segitiga, komparator akan mengeluarkan sinyal *off*. Karena terdapat tiga sinyal modulasi, maka terdapat tiga komparator. Keluaran dari tiap komparator dipecah menjadi dua, salah satunya diberi rangkaian pembalik. Dua keluaran dari tiap komparator menjadi sinyal pengontrol dua saklar pada kaki yang sama sehingga kedua saklar tersebut tidak mungkin menutup atau membuka pada saat yang bersamaan.



**Gambar 2.8** Gelombang Sinyal Ideal SPWM 3 Fasa (a) Sinyal Modulasi dan Sinyal *Carrier* (b) Kondisi Saklar 1 (c) Kondisi Saklar 3 (d) Tegangan Keluaran (e) Spektrum Tegangan Keluaran (f) Arus Keluaran (g) Arus DC (h) Spektrum Arus DC (i) Arus Saklar S1 (j) Arus Dioda D1[2]



Gambar 2.8 di atas menjelaskan mengenai prinsip kerja SPWM. Nilai tegangan keluaran dari inverter 3 fasa yang dikontrol dengan SPWM dapat ditentukan berdasarkan persamaan di bawah:

$$V_{ab1} = m_a \times \sqrt{3} \times \frac{V_i}{2} \quad 0 < m_a \leq 1 \quad (2.11)$$

$V_{ab1}$ : Tegangan fundamental keluaran *line to line* inverter

$m_a$ : Perbandingan antara amplitudo sinyal modulasi dengan amplitudo sinyal *carrier*

$V_i$ : Tegangan masukan inverter

Dari persamaan tersebut diketahui bahwa tegangan keluaran maksimal dari inverter didapat bila amplitudo sinyal modulasi sama besar dengan amplitudo sinyal *carrier*[2].

$$V_{rms} = m_a \times \frac{V_i}{\sqrt{2}} \quad (2.12)$$

$V_{rms}$ : Tegangan RMS keluaran *line to line* inverter

$m_a$ : Perbandingan antara amplitudo sinyal modulasi dengan amplitudo sinyal *carrier*

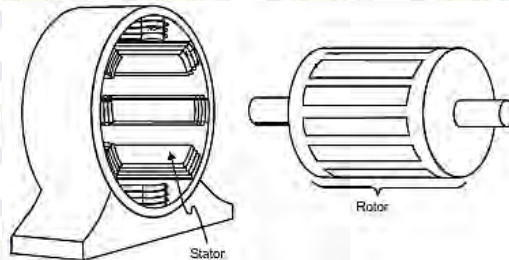
$V_i$ : Tegangan masukan inverter

## 2.5 Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi tiga fasa merupakan motor listrik arus bolak-balik yang paling banyak digunakan dalam dunia industri. Dinamakan motor induksi karena pada kenyataannya arus rotor motor ini bukan diperoleh dari suatu sumber listrik, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar. Dalam kenyataannya, motor induksi dapat diperlakukan sebagai sebuah transformator, yaitu dengan kumparan stator sebagai kumparan primer yang diam, sedangkan kumparan rotor sebagai kumparan sekunder yang berputar.

Motor induksi tiga fasa berputar pada kecepatan yang pada dasarnya adalah konstan, mulai dari tidak berbeban sampai mencapai keadaan beban penuh. Kecepatan putaran motor ini dipengaruhi oleh frekuensi, dengan demikian pengaturan kecepatan tidak dapat dengan mudah dilakukan terhadap motor ini. Walaupun demikian, motor

induksi tiga fasa memiliki beberapa keuntungan, yaitu sederhana, konstruksinya kokoh, harganya relatif murah, mudah dalam melakukan perawatan, dan dapat diproduksi dengan karakteristik yang sesuai dengan kebutuhan industri.



**Gambar 2.9** Penampang stator dan rotor motor induksi

### **2.5.1 Konstruksi Motor Induksi Tiga Fasa**

Sebuah motor induksi tiga fasa memiliki konstruksi yang hampir sama dengan motor listrik jenis lainnya. Motor ini memiliki dua bagian utama, yaitu

#### **a. Stator**

Stator terdiri atas tumpukan laminasi inti yang memiliki alur yang menjadi tempat kumparan dililitkan yang berbentuk silindris. Alur pada tumpukan laminasi inti diisolasi dengan kertas (Gambar 2.10). Tiap elemen laminasi inti dibentuk dari lempengan besi (Gambar 2.10). Tiap lempengan besi tersebut memiliki beberapa alur dan beberapa lubang pengikat untuk menyatukan inti. Tiap kumparan tersebar dalam alur yang disebut belitan fasa untuk motor tiga fasa, belitan tersebut terpisah secara listrik sebesar  $120^\circ$ . Kawat kumparan yang digunakan terbuat dari tembaga yang dilapis dengan isolasi tipis. Kemudian tumpukan inti dan belitan stator diletakkan dalam cangkang silindris (Gambar 2.10). Berikut ini contoh lempengan laminasi inti, lempengan inti yang telah disatukan, belitan stator yang telah dilekatkan pada cangkang luar untuk motor induksi tiga fasa.



**Gambar 2.10** Komponen Stator Motor Induksi 3 Fasa

Komponen Stator :

- (a) Lempengan Inti,
- (b) Tumpukan Inti dengan Kertas Isolasi pada Beberapa Alurnya
- (c) Tumpukan Inti dan Kumputan dalam Cangkang Stator.

b. Rotor

Berdasarkan jenis rotornya, motor induksi tiga fasa dapat dibedakan menjadi dua jenis, yang juga akan menjadi penamaan untuk motor tersebut, yaitu rotor belitan (*wound rotor*) dan rotor sangkar tupai (*squirrel cage rotor*).

Jenis rotor belitan terdiri dari satu set lengkap belitan tiga fasa yang merupakan bayangan dari belitan pada statornya. Belitan tiga fasa pada rotor belitan biasanya terhubung Y, dan masing-masing ujung dari tiga kawat belitan fasa rotor tersebut dihubungkan pada slip ring yang terdapat pada poros rotor. Belitan-belitan rotor ini kemudian dihubungkan singkatkan melalui sikat (*brush*) yang menempel pada slip ring dengan menggunakan sebuah perpanjangan kawat untuk tahanan luar.

### 2.5.2 Prinsip Kerja Motor Induksi Tiga Fasa

Prinsip kerja dari motor ini adalah berdasar proses induksi yang terjadi pada bagian rotor, sehingga arus yang mengalir pada kumparan rotor merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan antara putaran rotor dengan medan putar stator yang dihasilkan oleh kumparan stator. Secara singkat prinsip kerja motor induksi tiga fasa adalah sebagai berikut [1] :

1. Ketika sumber tegangan disuplai pada kumparan stator, akan timbul medan putar dengan kecepatan angular ( $N_s$ ). Besar nilai kecepatan angular dapat dirumuskan sebagai berikut :



$$N_s = \frac{60 \cdot f}{p} \times 100\% \quad (2.13)$$

$f$  = frekuensi pada motor induksi

$p$  = jumlah pasang kutub

2. Medan putar stator akan memotong batang konduktor pada rotor, sehingga pada kumparan stator timbul gaya gerak listrik (ggl) induksi.
3. Ggl induksi yang timbul akan menyebabkan timbulnya arus pada kumparan rotor. Hal ini dikarenakan rangkaian rotor merupakan rangkaian tertutup.
4. Arus stator dan arus rotor akan menimbulkan torsi elektromagnetik ( $T_e$ ) pada motor. Jika torsi mula yang dihasilkan cukup besar, rotor akan berputar searah dengan medan putar stator.
5. Tegangan terinduksi jika ada perbedaan antara kecepatan angular dari medan putar stator ( $N_s$ ) dengan kecepatan putar rotor ( $N_r$ ). Selisih antara ( $N_s$ ) dan ( $N_r$ ) disebut dengan slip ( $S$ ), dinyatakan dengan :

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100\% \quad (2.14)$$

### 2.5.3 Frekuensi dan Slip Motor

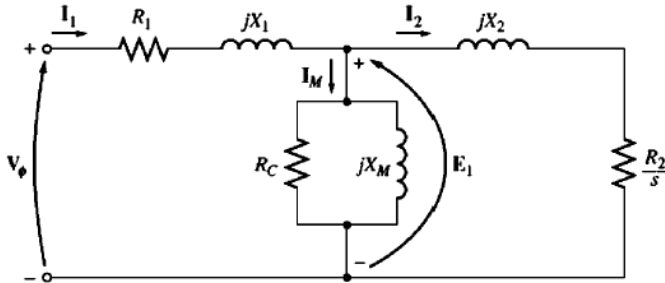
Jika kumparan stator dihubungkan dengan sumber tegangan tiga fasa, maka timbul medan magnet yang berputar dengan kecepatan sinkron ( $N_s$ ). Medan putar akan memotong penghantar atau kumparan rotor sehingga timbul gaya gerak listrik (ggl) induksi sehingga rotor berputar mengikuti medan putar stator. Bila beban bertambah, maka kopel motor akan naik sehingga arus induksi pada rotor akan membesar. Pada saat motor belum berputar, nilai frekuensi rotor sama dengan frekuensi pada belitan stator. Bila motor berputar, maka frekuensi rotor akan sebanding dengan perubahan slip yang terjadi pada motor tersebut. Pada motor induksi tiga fasa nilai slip ( $S$ ) tidak pernah bernilai nol.

### 2.5.4 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi

Untuk mempermudah analisis motor induksi dengan menggunakan rangkaian-rangkaian ekuivalen (Gambar 2.11), lebih dahulu ditinjau bahwa keadaan motor induksi dapat dianggap sebagai transformator



dengan stator merupakan rangkaian primer dan rotor sebagai rangkaian sekunder. Diasumsikan tegangan sumber adalah sinusoidal dan dalam keadaan tunak.



**Gambar 2.11** Rangkaian ekivalen motor induksi

Keterangan :

$R_1$  = Resistansi Stator (Ohm)

$R_2$  = Resistansi Rotor (Ohm)

$jX_1$  = Reaktansi Stator (Ohm)

$jX_2$  = Reaktansi Stator (Ohm)

$R_c$  = Resistansi Mutual (Ohm)

$jX_M$  = Reaktansi Mutual (Ohm)

$I_1$  = Arus Stator (Ampere)

$I_2$  = Arus Rotor (Ampere)

$I_M$  = Arus Magnetisasi (Ampere)

$E_1$  = Tegangan emf Stator (Volt)

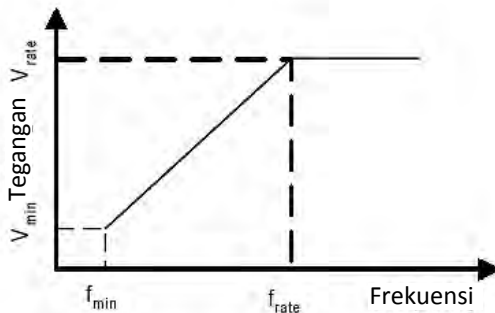
$V_\phi$  = Tegangan Stator (Volt)

$\frac{R_2}{s}$  = Slip (0-1)

Kerja motor induksi diibaratkan sebuah transformator, dengan kumparan primer adalah kumparan stator dan kumparan sekunder adalah rotor. Kedua kumparan tersebut tidak saling terhubung. Jadi kumparan stator akan menghasilkan fluks yang kemudian diserap kumparan rotor. Besarnya arus rotor bergantung dari besar slip, yang mana nilai slip dipengaruhi oleh besar beban motor atau besar torsi beban motor.

## 2.6 Slip Kontrol Dengan V/f Konstan

Slip motor induksi bergantung pada sumber dan beban motor. Dengan mengubah dua variabel tersebut slip motor dapat diubah-ubah nilainya. Pada tugas akhir ini motor dibebani oleh pompa yang mana besar torsi pompa bergantung pada spesifikasi pompa tersebut. Jadi untuk mengubah atau mengontrol slip yang mudah dan baik yaitu dengan mengubah karakteristik sumber motor induksi, yang berupa tegangan dan frekuensi.

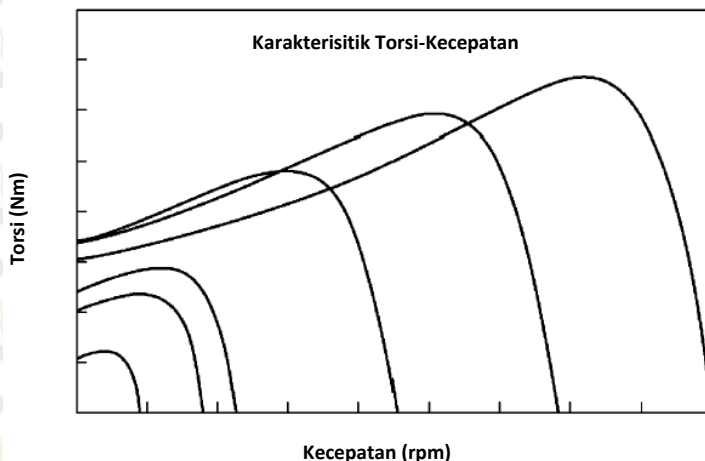


**Gambar 2.12** Karakteristik V – f pada kontrol V/f konstan

Motor induksi menghasilkan nilai slip yang besarnya dapat diubah dengan mengubah nilai tegangan dan frekuensinya. Mengubah besar tegangan input motor induksi akan secara langsung mengubah besar slip, namun terdapat banyak kelemahan dengan metode seperti ini, seperti kecepatan yang dapat diatur sangat terbatas, dikarenakan pada tegangan rendah torsi yang dihasilkan kecil. Jadi pada kecepatan rendah jika torsi beban besar kecepatan akan sangat rendah. Jadi sangat bergantung pada nilai torsi beban. Cara kedua untuk mengubah besar slip yaitu dengan mengubah nilai frekuensi input motor induksi 3 fasa. Cara ini lebih baik ketimbang cara pertama yaitu dengan mengubah nilai tegangan input, namun tetap saja masih memiliki kelemahan yang mendasar. Seperti bila frekuensi masukan tinggi torsi maksimum yang dihasilkan rendah. Jadi beban yang dapat suplai terbatas. Satu kelemahan yang penting terjadi yaitu kedua metode tersebut menghasilkan kerugian daya yang tinggi, atau efisiensi

motor induksi tiga fasa menjadi rendah. Kemungkinan terburuk motor induksi dapat rusak dikarenakan motor induksi terlalu panas.

Cara yang mudah namun memiliki banyak kelebihan yaitu dengan mengubah tegangan dan frekuensi dengan rasio yang sama seperti pada gambar 2.12, atau biasa disebut teknik kontrol V/f konstan. Teknik V/f konstan memiliki kelebihan yaitu pada kecepatan rendah dan tinggi dapat menghasilkan torsi yang tinggi seperti ditunjukkan pada gambar 2.13. Jadi kecepatan motor lebih stabil. Serta memiliki efisiensi yang tinggi.

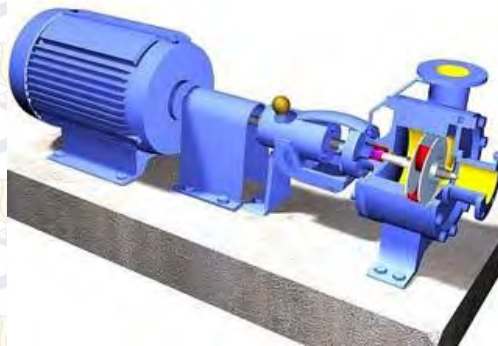


**Gambar 2.13** Karakteristik torsi-kecepatan pada berbagai nilai tegangan dan frekuensi

## 2.7 Pompa Sentrifugal

Pompa adalah mesin atau peralatan mekanis yang digunakan untuk menaikkan cairan dari dataran rendah ke dataran tinggi atau untuk mengalirkan cairan dari daerah bertekanan rendah ke daerah yang bertekanan tinggi dan juga sebagai penguat laju aliran pada suatu sistem jaringan perpipaan. Hal ini dicapai dengan membuat suatu tekanan yang rendah pada sisi masuk atau *suction* dan tekanan yang tinggi pada sisi keluar atau *discharge* dari pompa. Adapun bentuk dari motor dan pompa sentrifugal dapat dilihat pada Gambar 2.14.

Pada prinsipnya, pompa mengubah energi mekanik motor menjadi energi aliran fluida. Energi yang diterima oleh fluida akan digunakan untuk menaikkan tekanan dan mengatasi tahanan-tahanan yang terdapat pada saluran yang dilalui. Pompa sentrifugal memiliki sebuah impeller (baling-baling) yang bertujuan untuk mengalirkan zat cair dari suatu tempat ke tempat lain dengan cara mengubah energi zat cair yang dikandung menjadi lebih besar. Pompa digerakkan oleh motor. Daya dari motor diberikan pada poros pompa untuk memutar impeller yang dipasangkan pada poros tersebut. Karena pompa digerakkan oleh motor listrik (motor penggerak), sehingga daya guna kerja pompa adalah perbandingan antara gaya mekanis yang diberikan motor kepada pompa. Akibat dari putaran impeller yang menimbulkan gaya sentrifugal, maka zat cair akan mengalir dari tengah impeller keluar lewat saluran di antara sudut-sudut dan meninggalkan impeller dengan kecepatan yang tinggi.



**Gambar 2.14** Motor dan pompa sentrifugal

Zat cair yang keluar dari impeller dengan kecepatan tinggi kemudian melalui saluran yang penampangnya semakin membesar yang disebut *volute*, sehingga akan terjadi perubahan dari *head* kecepatan menjadi *head* tekanan. Jadi zat cair yang keluar dari flens keluar pompa *head* totalnya bertambah besar. Sedangkan proses pengisapan terjadi karena setelah zat cair dilemparkan oleh impeller, ruang diantara sudut-sudut menjadi vakum, sehingga zat cair akan terisap masuk.

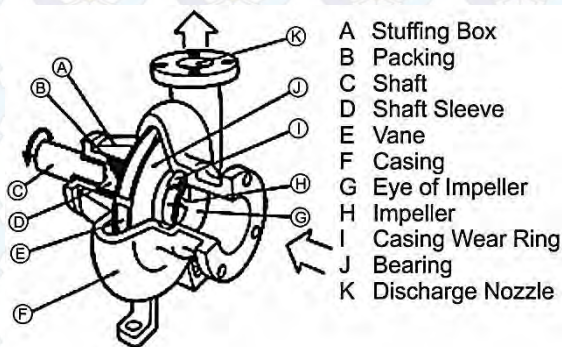
Selisih energi persatuan berat atau *head* total dari zat cair pada flens keluar dan flens masuk disebut sebagai *head* total pompa. Sehingga dapat dikatakan bahwa pompa sentrifugal berfungsi



mengubah energi mekanik motor menjadi energi aliran fluida. Energi ini mengakibatkan pertambahan *head* kecepatan, *head* tekanan dan *head* potensial secara kontinyu.

### 2.7.1. Bagian – Bagian Utama Pompa Sentrifugal

Dalam pengoperasian pompa sentrifugal ada beberapa bagian yang perlu diperhatikan agar pompa dapat bekerja dengan baik dan dapat bertahan lama. Adapun bagian-bagian utama pompa sentrifugal tersebut antara lain[4]:



Gambar 2.15 Rumah pompa sentrifugal

A. *Stuffing Box (Mechanical Seal)*

*Stuffing Box* berfungsi untuk mencegah kebocoran pada daerah pada poros pompa menembus casing.

B. *Packing*

*Packing* digunakan untuk mencegah dan mengurangi bocoran cairan dari *casing* pompa melalui poros. *Packing* terbuat dari asbes atau Teflon.

C. *Shaft* (poros)

Poros berfungsi untuk meneruskan momen puntir dari penggerak selama beroperasi dan tempat kedudukan impeller dan bagian-bagian berputar lainnya.

D. *Shaft-sleeve*

*Shaft sleeve* berfungsi untuk melindungi poros dari erosi, korosi dan keausan pada *stuffing box*. Pada pompa *multi stage* dapat sebagai *leakage joint*, internal bearing dan interstage atau *distance sleever*.

E. *Vane*

*Vane* impeller berfungsi sebagai tempat berlalunya cairan pada impeller.

F. *Casing*

*Casing* merupakan bagian paling luar dari pompa yang berfungsi sebagai pelindung elemen yang berputar, tempat kedudukan *diffusor (guide vane)*, *inlet* dan *outlet nozel* serta tempat memberikan arah aliran dari impeller dan mengkonversikan energi kecepatan cairan menjadi energi dinamis (*single stage*).

G. *Eye of Impeller*

Bagian sisi masuk pada arah isap impeller.

H. *Impeller*

*Impeller* berfungsi untuk mengubah energi mekanis dari pompa menjadi energi kecepatan pada cairan yang dipompakan secara kontinyu, sehingga cairan pada sisi isap secara terus menerus akan masuk mengisi kekosongan akibat perpindahan dari cairan yang masuk sebelumnya.

Impeller adalah bagian penting pompa sentrifugal, didalam terjadi perubahan energi mekanis berupa putaran menjadi kecepatan, aliran impeller akan diputar oleh motor penggerak pompa, menyebabkan aliran akan berputar dan gerakan aliran akan mengikuti impeller dan keluar dengan kecepatan yang besar. Pada impeller juga terjadi *head* atau tekanan dan kecepatan aliran akan bertambah besar.

I. *Wearing Ring*

*Wearing ring* berfungsi untuk memperkecil kebocoran cairan yang melewati bagian depan impeller maupun bagian belakang impeller, dengan cara memperkecil celah antara *casing* dengan impeller.

J. *Bearing*

*Bearing* (bantalan) berfungsi untuk menahan beban dari poros agar dapat berputar, baik berupa beban radial maupun beban axial. *Bearing* juga memungkinkan poros untuk dapat berputar dengan lancar dan tetap pada tempatnya, sehingga kerugian gesek menjadi kecil.

K. *Discharge Nozzle*

*Discharge nozzle* adalah saluran cairan keluar dari pompa dan berfungsi juga untuk meningkatkan energi tekanan keluar pompa.





## BAB 3

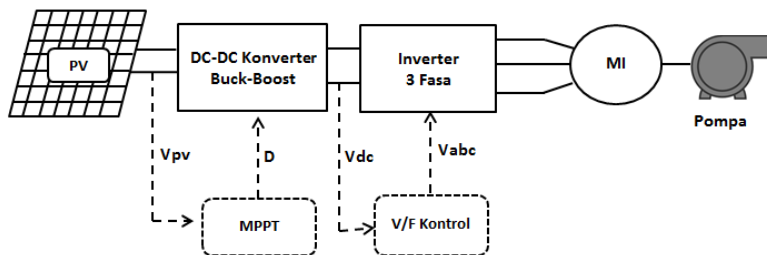
### DESAIN SISTEM POMPA AIR SEL SURYA BERBASIS MPPT DAN V/f KONTROL

#### 3.1 Pemodelan Sistem

daya listrik dari sumber sel surya sangat bervariasi besarnya, bergantung dari intensitas radiasi matahari. Secara umum tingkat radiasi matahari paling besar sekitar  $1000 \text{ W/m}^2$ . Radiasi matahari bukan satu-satunya penentu dari besarnya daya listrik yang dihasilkan namun juga karakteristik dari kurva V-I seperti gambar juga menentukan besar daya. Apabila sel surya terkoneksi langsung dengan beban maka daya listrik dari sel surya tidak akan maksimal sesuai hukum grafik V-I sel surya, sehingga diperlukan suatu kontrol yang akan memaksa sel surya bekerja pada daerah yang optimal dan efisiensi sel surya t maksimal. Kontrol untuk memaksimalkan efisiensi sel surya secara umum dinamakan MPPT (*maximum power point tracking*), dalam tugas akhir ini memakai metode tegangan keluaran sel surya tetap pada kondisi optimal. MPPT tersebut mengontrol nilai *duty cycle* dari DC-DC konverter.

Sumber PV-MPPT menghasilkan daya yang tidak tetap, berubah-ubah sepanjang waktu dan tidak dapat diprediksi. Sumber PV-MPPT menghasilkan tegangan DC. Bila sel surya dipasang secara langsung pada peralatan listrik, akan mengakibatkan peralatan tersebut tidak bekerja pada ratingnya, yang mana dapat menurunkan efisiensi dan bahkan merusak peralatan listrik tersebut. Pada tugas akhir ini daya PV-MPPT akan menyuplai peralatan listrik yaitu motor induksi 3 fasa, motor induksi akan dibebani dengan pompa air sentrifugal. Motor induksi membutuhkan sumber listrik ac tiga fasa, sehingga sebelum daya listrik dari sel surya sampai ke motor induksi harus diubah dulu menjadi sumber listrik tiga fasa. Pengontrolan motor induksi dilakukan pada inverter (mengubah dc ke ac). Kontrol yang dipakai yaitu optimum slip dengan teknik V/f konstan yaitu apabila tegangan sumber berubah maka akan mempengaruhi efisiensi dan sebaliknya, dengan nilai perbandingan yang tetap. Tujuan dari control V/f ini adalah untuk meningkatkan efisiensi motor induksi agar selalu optimum.





**Gambar 3.1** Pemodelan sederhana sistem

Daya listrik yang dihasilkan sel surya akan akan dikontrol menggunakan MPPT teknik tegangan output PV tetap oleh karena itu diperlukan DC-DC converter berupa *buck* konverter, yang mana nilai duty cyclenya akan dikontrol menggunakan PI kontroler. PI kontroler mendapat masukan sinyal *error* dari hasil pengurangan antara tegangan PV aktual dengan tegangan PV yang dikehendaki. Jadi dengan kontrol ini tegangan PV akan bernilai tetap walaupun tingkat radiasi yang diserap sel surya berubah-ubah.

Blok inverter berfungsi untuk mengkonversi arus dc keluaran dari konverter menjadi arus ac tiga fasa. *Switching* pada Inverter 3 fasa dikendalikan oleh SPWM (*Sinusoidal Pulse Width Modulation*). Pada SPWM ini menggunakan sinyal segitiga sebagai sinyal *carrier* dan sinyal sinusoidal sebagai sinyal referensi. Kontrol motor induksi berupa slip kontrol dengan teknik V/f konstan. Tegangan DC dari konverter DC akan dikalikan dengan suatu konstanta V/f sehingga diperoleh frekuensi yang diinginkan atau optimum. Nilai frekuensi tersebut akan masuk blok tranformasi dq-abc sehingga diperoleh sinyal referensi tiga fasa sinusoidal yang meliki frekuensi yang dikehendaki. Sinyal sinusoidal tiga fasa ini akan menjadi sinyal referensi untuk switching inverter tiga fasa. Sehingga dengan menggunakan kontrol ini motor induksi akan bekerja pada efisiensi tinggi walaupun daya input berubah-ubah. Motor induksi akan menggerakkan pompa sentrifugal yang berfungsi memindahkan zat cair

### 3.2. Panel Surya

Beban yang digunakan pada sistem ini berupa motor induksi dengan kapasitas daya sebesar 1,5 HP atau 1119 Watt. Minimum daya solar sel yang dihasilkan harus 1119 Watt, sehingga daya PV yang dibutuhkan kurang lebih sama, Jadi dipilih daya panel surya maksimum

1140 Watt. panel surya yang dipilih adalah BPSSX60. Panel tersebut menghasilkan daya maksimum 60 Watt dengan tegangan dan arus saat Pmax yaitu 17.1 volt dan 3.5 Ampere. Masing masing sel surya mempunyai spesifikasi yang ditunjukkan pada tabel 3.1

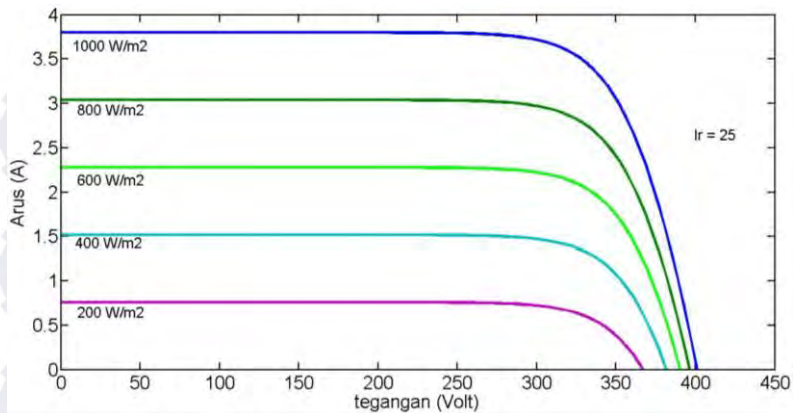
**Tabel 3.1** Parameter Panel Surya BPSSX-60

<i><b>Electrical Parameters</b></i>		<i><b>Explanation</b></i>
A	1.2	<i>Ideality diode factor of PN junction</i>
$E_g$	1.12 eV	<i>Band gap energy</i>
$n_p$	1	<i>Number of parallel-connected modules</i>
$n_s$	36	<i>Number of series-connected modules</i>
$P_{MAX}$	60 W	<i>Maximum power at standard condition</i>
$V_{MAX}$	17. V	<i>Voltage at the maximum power point</i>
$I_{MAX}$	3.5 A	<i>Current at the maximum power point</i>
NOCT	25 °C	<i>Nominal operating cell temperature</i>
$I_{sc}$	3.8 A	<i>Short-circuit current at standard condition</i>
$V_{oc}$	21.1 V	<i>Open-circuit voltage at standard condition</i>
$K_V$	-0.38 V/ °C	<i><math>V_{oc}</math> temperature coefficient</i>
$K_i$	0.065%/ °C	<i><math>I_{sc}</math> temperature coefficient</i>

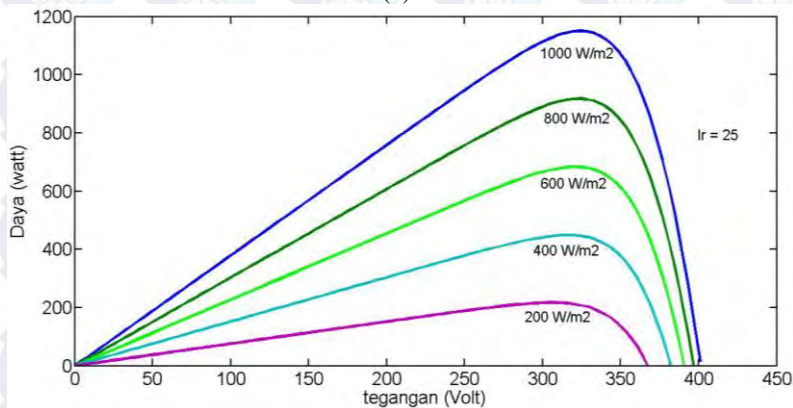
Agar memenuhi kebutuhan beban diperlukan 19 buah panel surya yang disusun secara seri sehingga diperoleh tegangan 324.9 Volt dan arus 3.5 Volt saat Pmax, daya maksimum yang diperoleh adalah sebesar 1140 Watt seperti ditunjukkan pada tabel 3.2. panel surya tersebut memiliki karakteristik seperti ditunjukkan pada gambar 3.2. sehingga agar diperoleh daya yang selalu maksimal maka perlu ditambahkan MPPT (*maximum power pont tracking*)

**Tabel 3.2** Jumlah Panel Surya BPSSX-60 yang dibutuhkan

<b>Panel Surya</b>	<b>Jumlah Seri</b>	<b>Jumlah Paralel</b>	<b>Total</b>
Jumlah Panel	19	1	19
Daya Total			1140 Watt



(a)



(b)

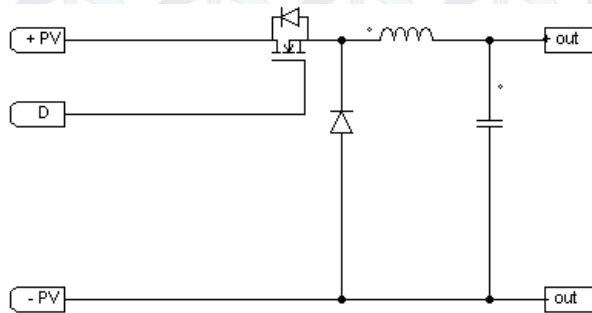
**Gambar 3.2** karakteristik panel surya. (a) karakteristik V-I; (b) karakteristik V-P.

### 3.3. Desain *Buck* Konverter

#### 3.3.1. Rangkaian *Buck* Konverter

Mwngacu pada gambar 3.1 Rangkaian *buck* konverter terdiri dari sumber tegangan DC berupa  $V_{PV}$ , induktor, satu buah saklar terkontrol berupa MOSFET yang dikontrol oleh dua buah sinyal, yaitu sinyal segitiga frekuensi 10000 Hz sebagai sinyal *carrier* dan sinyal *duty cycle*

yang berupa sinyal dc konstan hasil keluaran PI kontroler, serta ada sebuah dioda, dan kapasitor seperti gambar 3.3.



**Gambar 3.3** Pemodelan buck konverter

Secara ideal *buck* konverter dapat menurunkan tegangan hingga 0 volt. Untuk menurunkan tegangan dapat diatur dengan mengubah *duty cyclenya*. Nilai *duty cycle* dikontrol PI kontroler, sehingga Sebelum masuk ke rangkaian inverter-motor maka terlebih dahulu diubah atau dikontrol level tegangannya. Tujuan pengontrolan ini agar daya dari pv dapat maksimal dan efisiensi PV mendekati 100%. Setiap komponen dalam rangkaian ini diasumsikan bersifat ideal sehingga daya input konverter bernilai sama dengan daya outputnya.

*Buck* konverter pada sistem pompa air sel surya ini digunakan untuk menurunkan level tegangan sebelum terhubung dengan inverter. Level tegangan yang dinaikkan atau diturunkan hanya bergantung dari nilai *duty cycle* saja. Semakin kecil *duty cycle* maka semakin kecil pula tegangan yang dihasilkan. Tegangan keluaran akan bernilai sama bila *duty cycle* bernilai 100%. Untuk menentukan parameter nilai nilai komponen yang diperlukan, seperti nilai *duty cycle*, nilai beban, tegangan keluaran dan frekuensi pensaklaran. Saat motor mendapatkan daya maksimum dari PV nilai *duty cycle* sebesar 90% dan tegangan keluaran 310 volt, arus sekitar 3,7 A dan frekuensi pensaklaran sebesar 10000 Hz.

Berdasarkan persamaan (2.4) maka nilai induktor dapat dicari sebagai berikut :



$$L_{min} = \left( \frac{(1 - D)R}{2f} \right)$$

$L_{min}$  adalah nilai induktor minimum (*Henry*)  
 $R$  adalah beban *buck* konverter (*Ohm*)  
 $f$  adalah frekuensi pensaklaran (*Hz*)  
 $D$  adalah *duty cycle* (0-1)

Dengan memasukkan nilai  $R = 90 \text{ Ohm}$  berdasarkan beban motor maksimum, frekuensi  $10000 \text{ Hz}$  dan *duty cycle*  $90\%$ , maka diperoleh hasil :

$$L_{min} = \frac{R}{2f} (1 - D) = \frac{90}{2 \cdot 10^4} (1 - 0.9) = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ H}$$

Jadi nilai induktor harus lebih besar dari  $0.45 \text{ mH}$ . Agar diperoleh hasil yang lebih baik dan maka dipilih sebesar  $1.5 \text{ mH}$ . Induktor ini juga berfungsi sebagai perata arus. Semakin besar induktor, maka semakin kecil riak arus pada sistem.

Selanjutnya yaitu menentukan nilai kapasitor, berdasarkan persamaan (2.6). Terdapat 2 kapasitor pada rangkaian *buck* konverter, yang pertama dipasang paralel sebelum rangkaian *buck* berfungsi untuk meratakan tegangan keluaran sel surya dan yang kedua dipasang paralel setelah rangkaian *buck* yang berfungsi meratakan tegangan keluaran dari konverter *buck*

. Riak tegangan kira-kira didesain sekitar  $0,1\text{V}$ , sehingga diperoleh nilai kapasitor

$$C = \frac{(1 - D)}{8L(\Delta V/V_0)f^2} = \frac{(1 - 0,9)}{8 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} (0,1/310) 10000^2} = 258 \mu\text{F}$$

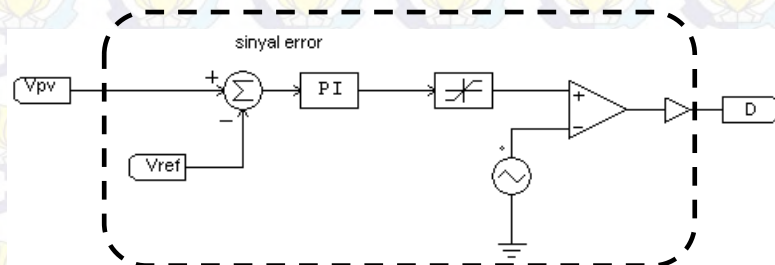
$C$  adalah nilai induktor (*Farad*)  
 $R$  adalah beban *buck* konverter (*Ohm*)  
 $f$  adalah frekuensi pensaklaran (*Hz*)  
 $\Delta V_0$  adalah riak tegangan konverter (*Volt*)

Berdasarkan rumus (2.6) semakin besar kapasitor, semakin kecil riak tegangan keluaran dari *buck converter*, jadi dipilih lebih besar

sedikit yaitu 300  $\mu\text{H}$ . untuk nilai kapasitor sebelum rangkaian konverter ini dipilih lebih kecil yaitu 470  $\mu\text{H}$ .

### 3.4 Desain MPPT Teknik Tegangan PV Tetap

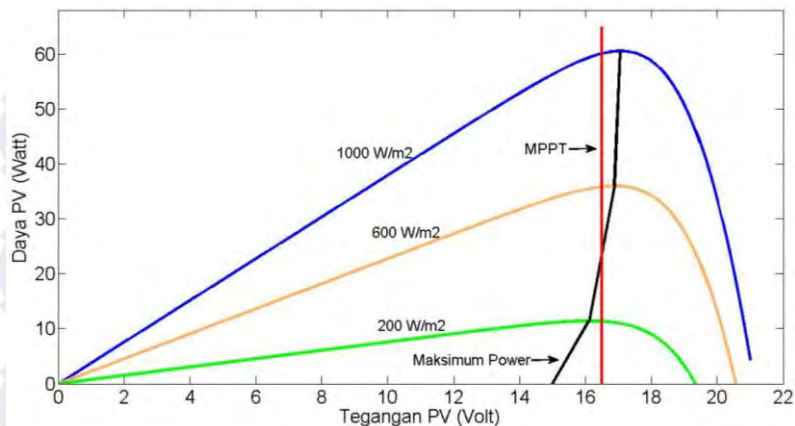
Pencarian titik daya maksimum atau MPP dari PV dengan menggunakan metode tegangan keluaran PV tetap ini menggunakan sebuah kontroler PI untuk mengatur nilai duty cycle gambar 3.4 agar tegangan keluaran PV bernilai tetap pada nilai yang optimum.



Gambar 3.4 Pemodelan sistem kontrol MPPT

Karakteristik panel surya terlihat pada gambar 3.5 menunjukkan hubungan V-P panel surya. Saat kondisi tertentu pada tiap radiasi yang diberikan akan ditemukan titik daya maksimum. Dari radiasi 1000  $\text{W}/\text{m}^2$  hingga 100  $\text{W}/\text{m}^2$ , apabila titik daya optimum tersebut ditarik garis lurus akan berbentuk garis yang mendekati vertikal, pada range tegangan 15-17 Volt. Sehingga bila tegangan PV dijaga tetap pada nilai kisaran tegangan tersebut maka daya PV yang dihasilkan akan mendekati maksimum.

MPPT tegangan tetap akan mengontrol tegangan keluaran PV agar bernilai konstan pada nilai tertentu yang optimum. Kisaran tegangan optimum pada panel surya yaitu 15V-17V gambar 3, jadi nilai referensi untuk tegangan tetapnya dipilih yaitu 16.5 Volt gambar 3.5. Mengacu pada gambar 3.1 Tegangan referensi akan mengurangi tegangan aktual PV, selisih dari pengurangan ini dinamakan tegangan error. Keluaran tegangan error akan masuk blok PI kontroler dan menghasilkan nilai duty cycle yang sesuai, seperti ditunjukkan pada gambar 3.4.



**Gambar 3.5** Karakteristik PV dengan dan tanpa MPPT

Hasil yang didapat bila menggunakan MPPT jenis ini akan terlihat pada tabel 3.3. Dari tabel 3.3 tersebut selisih daya yang dihasilkan PV menggunakan MPPT terhadap maksimum daya PV, akan sangat kecil. Sehingga dengan menggunakan MPPT tersebut daya yang dihasilkan akan mendekati maksimum.

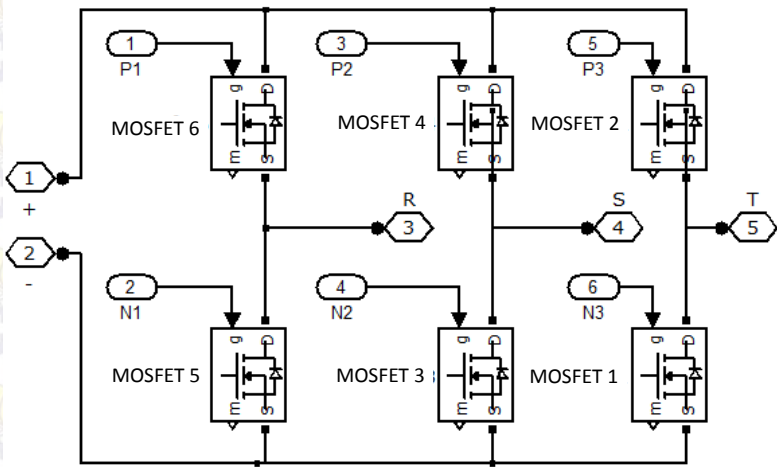
MPPT jenis ini sangat cocok pada peralatan dengan rating daya rendah dibawah 5 KW, karena kontrol MPPT ini tergolong sederhana dan memakan biaya yang rendah, dengan perawatan yang mudah.

**Tabel 3.3** Perbandingan daya Maksimum PV dengan daya PV dengan MPPT

<b><i>Radiasi (W/m<sup>2</sup>)</i></b>	<b><i>Daya Maksimum</i></b>	<b><i>Daya MPPT</i></b>	<b><i>Eff MPPT terhadap daya maksimum</i></b>
1000	60,53 W	60,2 W	99,45 %
600	35,96 W	35,85 W	99,69 %
200	11,41 W	11,34 W	99,38 %

### 3.5 Inverter Tiga Fasa

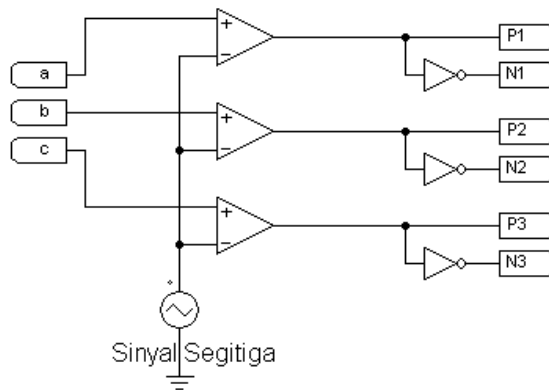
Mengacu pada gambar 3.1 keluaran dari sel surya berupa DC, sedangkan beban berupa motor induksi tiga fasa. Oleh karena keluaran sel surya harus diubah menjadi AC menggunakan inverter tiga fasa. Inverter tiga fasa ini terdiri dari 6 buah komponen MOSFET. Setiap fasa terdiri dari dua buah MOSFET yang masing-masing akan menyala secara bergantian. Pemodelan inverter tiga fasa seperti ditunjukkan pada Gambar 3.6.



**Gambar 3.6** Pemodelan inverter tiga fasa

Teknik *switching* yang digunakan pada inverter tiga fasa adalah *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM) pada gambar 3.7. Teknik *switching* dengan membandingkan antara sinyal sinusoidal sebagai sinyal referensi dan sinyal segitiga sebagai sinyal *carrier*. Sinyal sinusoidal berasal dari pembangkit gelombang sinus tiga fasa, dengan frekuensi yang didapat dari hasil kontrol V/f dan memiliki amplitudo 1Volt. Sinyal segitiga yang digunakan menggunakan frekuensi tinggi yaitu 10KHz dengan amplitudo sama 1Volt. Pemodelan *switching* inverter tiga menggunakan SPWM seperti ditunjukkan pada Gambar 3.6





**Gambar 3.7** Pemodelan SPWM

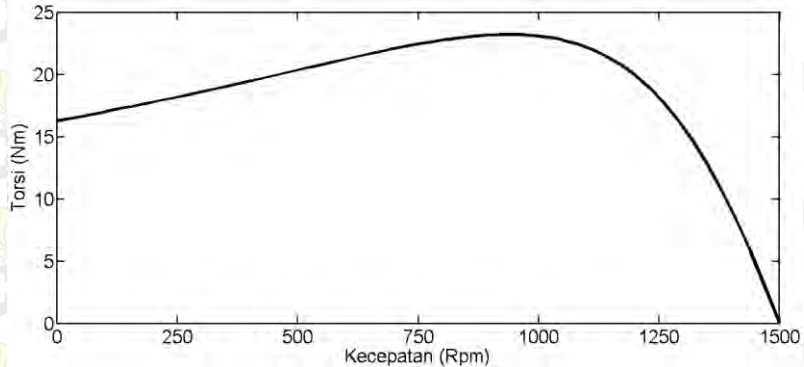
### 3.6 Motor Induksi Tiga Fasa

Mengapa memilih Motor induksi 3 fasa, karena mempunyai banyak keunggulan dari motor jenis lain. Keunggulan motor induksi adalah konstruksinya yang kuat, tidak ada kontak antara stator dan rotor kecuali bearing, tenaga yang besar, daya listrik rendah, hampir tidak ada perawatan dan harga yang relatif murah. Saat ini motor induksi sering digunakan pada berbagai aplikasi, salah satu aplikasi motor induksi yang sangat menjanjikan adalah sebagai penggerak pompa air. Dengan berbagai keunggulan yang dimiliki, motor induksi 3 fasa dianggap sangat cocok untuk menggerakkan pompa air.

**Tabel 3.4** Parameter Motor Induksi Tiga Fasa

<i><b>Parameter</b></i>	<i><b>Nilai</b></i>
Daya Nominal	1,5 HP
Tegangan	220 Volt
Frekuensi	50 Hz
Tipe Rotor	Sangkar tupai
Resistansi Stator	1,2554 $\Omega$
Resistansi Rotor	1,8628 $\Omega$
Induktansi Stator	0,007834 H
Induktansi Rotor	0,007834 H
Mutual Induktansi	0,2066 H
Inersia	0,02 kg.m <sup>2</sup>
Jumlah Pasang Kutub	2

Pada tugas akhir ini menggunakan motor bertenaga 1.5 HP atau setara 1119 Watt, dengan tegangan line to line sebesar 220 Volt AC dengan frekuensi 50 Hz. Untuk spesifikasi lengkap dapat dilihat pada tabel 3.4. Jika motor induksi tersebut diberi tegangan dan frekuensi pada ratingnya, diperoleh karakteristik kecepatan dan torsi seperti ditunjukkan pada gambar 3.8.

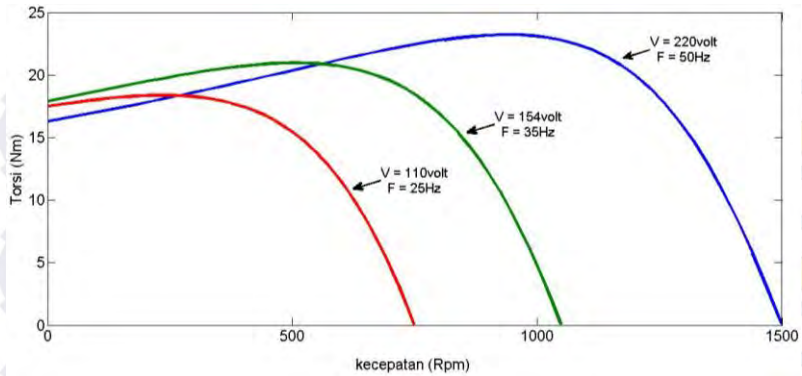


**Gambar 3.8** Karakteristik motor induksi 3 fasa sumber 220 V L-L frekuensi 50 Hz

### 3.7 Kontrol V/f Konstan

Pada Pompa air sel surya tanpa baterai, motor akan mendapat suplai daya yang berubah-ubah sepanjang waktu, termasuk juga nilai tegangan dan arus juga akan berubah. Bila karakteristik daya PV terhubung pada motor induksi 3 fasa tanpa memakai kontrol tertentu maka akan mengakibatkan efisiensi motor rendah, dan dapat mengakibatkan motor cepat panas dan cepat rusak. Jadi diperlukan suatu system kontrol untuk menjaga agar motor bekerja optimal dengan efisiensi yang tinggi, sehingga kerugian daya dapat ditekan.

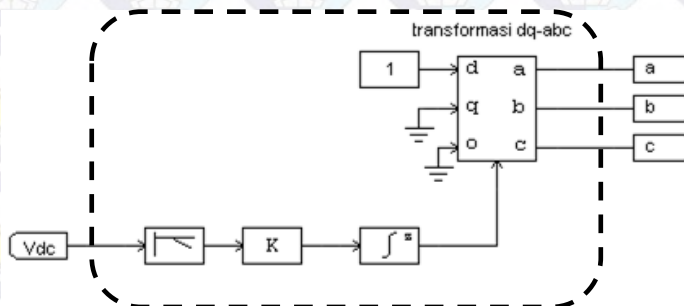
Teknik kontrol motor induksi 3 fasa menggunakan kontrol slip dengan teknik V/f konstan. Kontrol ini akan membuat nilai tegangan dan frekuensi motor induksi mempunyai perbandingan yang selalu sama, sesuai hukum V/f nilai tegangan akan maksimum pada nilai ratingnya dan begitu juga frekuensi. Nilai tegangan akan maksimum pada tegangan 220 Volt.



**Gambar 3.9** Karakteristik motor induksi pada tegangan dan frekuensi dengan rasio konstan

Parameter motor induksi pada tabel 3.4 bila diberi sumber dengan berbagai variasi nilai tegangan dan frekuensi terlihat pada gambar 3.9, terlihat bahwa dengan menjaga rasio nilai tegangan dan frekuensi diperoleh nilai torsi yang stabil, sehingga mudah untuk dikontrol kecepatannya.

Mengacu pada gambar 3.1, desain kontrol V/f konstan tampak seperti gambar 3.10. Hasil keluaran konverter akan dikalikan dengan suatu konstanta menjadi frekuensi yang diinginkan, dengan perbandingan  $V/f$  4.4/1. Frekuensi masukan akan di integral dan masuk sebagai theta pada blok transformasi dq-abc, masukan d dibuat konstan 1 volt, sedangkan masukan q dihubungkan ke *ground*. Hasil keluaran berupa gelombang sinusoidal 3 fasa sebagai sinyal referensi SPWM.

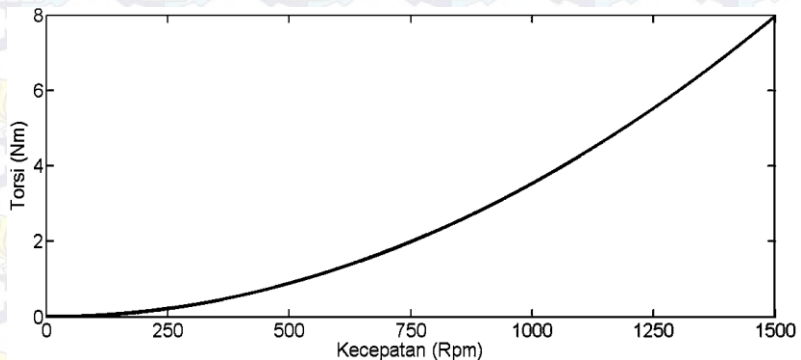


**Gambar 3.10** Pemodelan kontrol V/f konstan

Motor induksi memiliki rating tegangan 220V RMS line to line dan frekuensi 50Hz jadi nilai V/f dari motor induksi tiga fasa tersebut adalah 4.4.

### 3.8 Pompa Sentrifugal

Pompa sentrifugal yang digunakan pada tugas akhir ini digunakan untuk memompa air. Pompa sentrifugal akan digerakkan oleh motor induksi tiga fasa. Grafik karakteristik Torsi–kecepatan pompa terlihat pada gambar 3.11.



**Gambar 3.11** Karakteristik kecepatan-torsi pompa sentrifugal

Pada gambar 3.11, terlihat semakin besar kecepatan motor maka semakin besar pula torsi beban. Karakteristik tersebut adalah untuk jenis pompa sentrifugal, Sesuai dengan persamaan.

$$T = KW^2$$

- $T$  : Torsi Beban pada pompa air (Nm)  
 $K$  : Konstanta Pompa sentrifugal ( $\text{Nms}^2/\text{rad}^2$ )  
 $W$  : Kecepatan Pompa (rad/s)

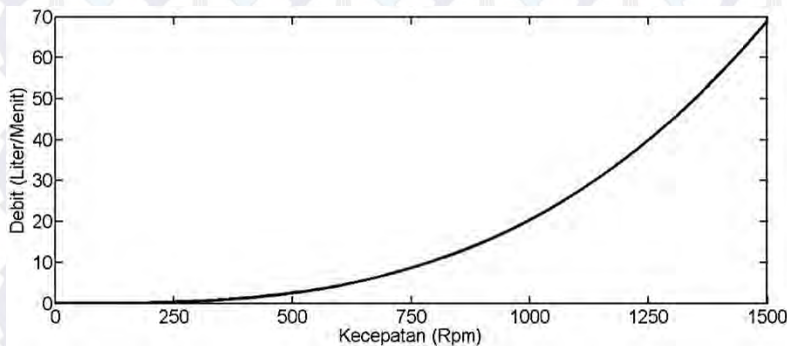
Nilai torsi pompa sentrifugal adalah kudrat kecepatan pompa dikalikan dengan suatu konstanta pompa. Konstanta pompa inilah yang akan membedakan karakteristik antara pompa satu dengan pompa yang lainnya.



**Tabel 3.5** Parameter pompa sentrifugal

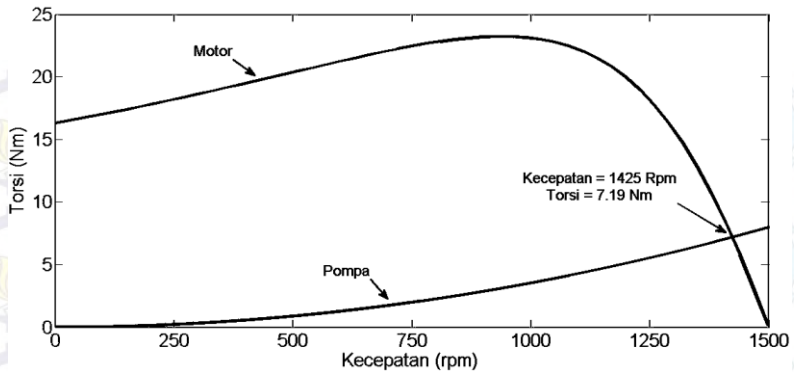
<i>Parameter</i>	<i>Nilai</i>
Torsi Nominal	8 Nm
Kecepatan Nominal	1500 Rpm
Konstanta Pompa	$3,225 \text{ m Nms}^2/\text{rad}^2$
Head Pump	1 m

. Hubungan besar debit air yang dipompakan terhadap kecepatan pompa terlihat pada gambar 3.12. Semakin besar kecepatan semakin besar pula debit air yang dipompa. Besar debit air berbanding kuadrat terhadap kecepatan pompa atau motor.



**Gambar 3.12** Karakteristik kecepatan-debit pompa sentrifugal

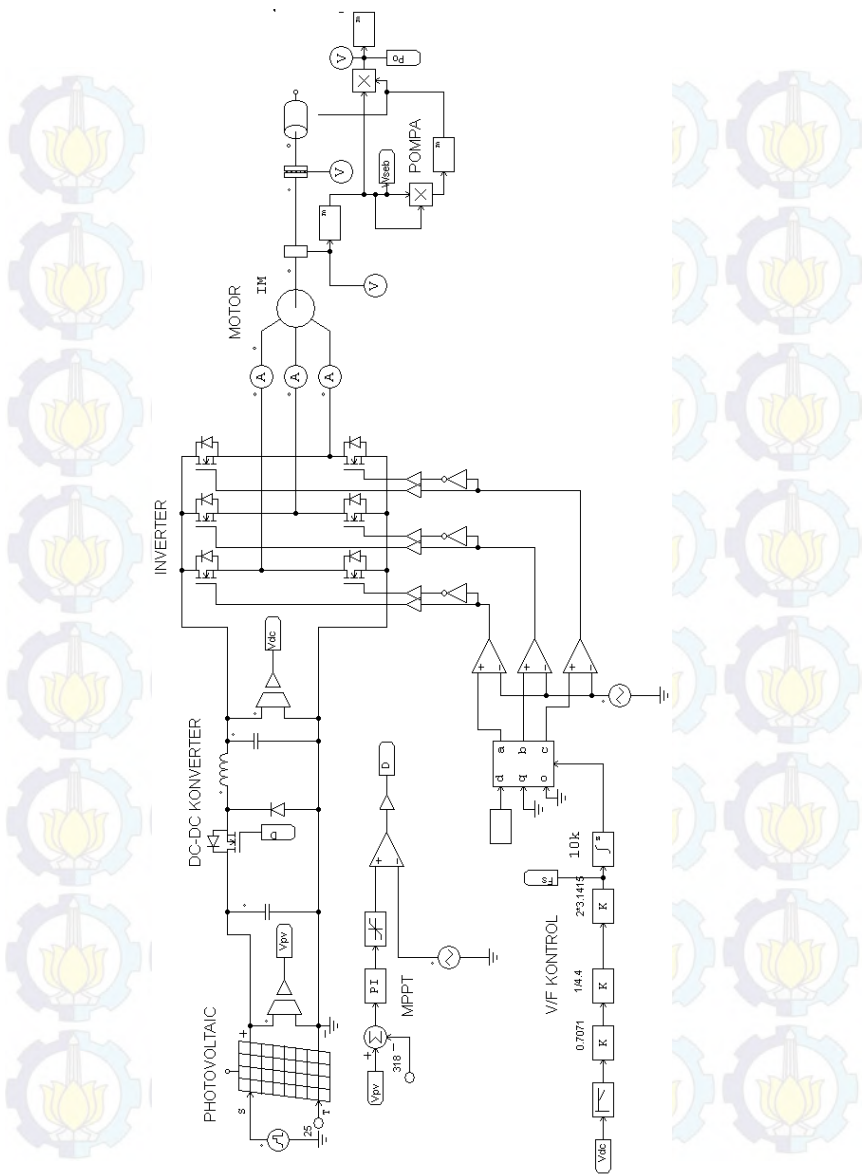
Pompa dengan spesifikasi pada tabel 3.5 dihubungkan dengan motor induksi 3 fasa dengan spesifikasi pada tabel 3.4, kemudian dihubungkan dengan sumber 3 fasa tegangan 220 Volt line to line dan frekuensi 50 Hz. Motor-pompa akan bekerja seperti pada gambar 3.13, terlihat motor dikopel dengan pompa bila akan bekerja pada kecepatan 1425 Rpm dengan torsi 7.19 Nm.



**Gambar 3.13** Karakteristik Motor-Pompa

### 3.9 Pemodelan Seluruh Sistem

Blok-blok yang terdiri dari PV, *buck converter*, Inverter, motor induksi dan pompa sentrifugal, kemudian disatukan ke dalam satu sistem utuh seperti ditunjukkan oleh Gambar 3.14



**Gambar 3.14** Pemodelan seluruh sistem

## **BAB 4**

### **SIMULASI SISTEM DAN ANALISIS DATA**

Dalam bab ini akan dibahas mengenai hasil simulasi dan analisis data dari simulasi terhadap sistem pompa tenaga sel surya yang meliputi:

1. Menentukan nilai tegangan keluaran sel surya yang optimum, sebagai tegangan referensi untuk kontrol MPPT.
2. Simulasi keseluruhan sistem dengan kontrol MPPT dan tanpa kontrol MPPT. simulasi dilakukan pada variasi keadaan intensitas sinar matahari  $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $750 \text{ W/m}^2$ ,  $500 \text{ W/m}^2$ , dan  $250 \text{ W/m}^2$ .

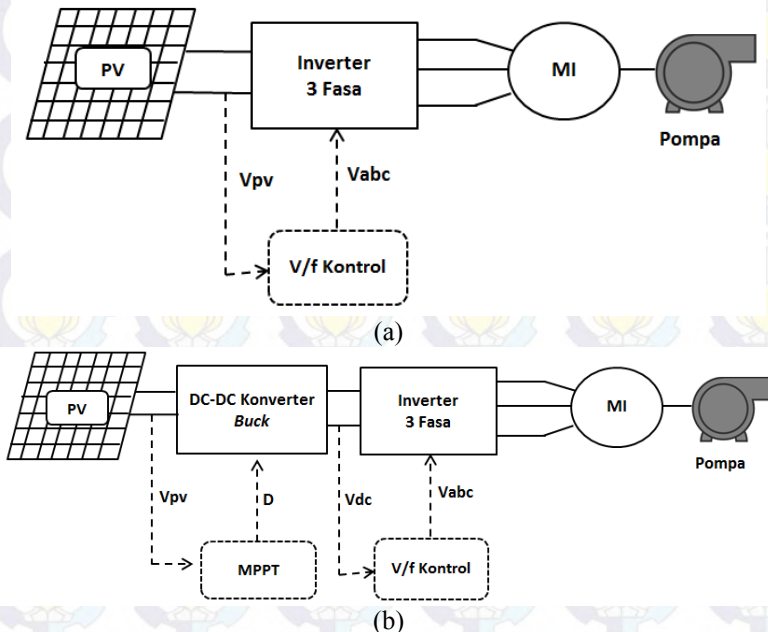
Seluruh point diatas menggunakan suhu yang tetap  $25^{\circ}\text{C}$ , seluruh simulasi akan membandingkan sistem tanpa MPPT dengan sistem memakai MPPT. Pada point 1 nilai radiasi dari  $1000 \text{ W/m}^2$  hingga  $0 \text{ W/m}^2$  atau diseluruh radiasi yang mungkin. Adapun data yang akan dianalisis pada kedua simulasi sistem diatas adalah:

1. Data yang akan dianalisis pada point 1 adalah, karakteristik (V-I) dan (V-P) sel surya, untuk dihubungkan pada keseluruhan sistem tanpa MPPT dan Sistem dengan MPPT. Pada point 1 juga akan diperoleh nilai tegangan optimum untuk masukan referensi kontrol MPPT.
2. Data yang akan dianalisis pada point 2 adalah daya yang dikeluarkan oleh sel surya, efisiensi daya sel surya terhadap daya maksimum, tegangan sel surya, arus sel surya, tegangan keluaran konverter DC, frekuensi, kecepatan, torsi, dan slip motor induksi, debit air serta volume air yang dikeluarkan oleh pompa sentrifugal selama 20 detik. Simulasi sistem menggunakan software PSIM.



#### 4.1 Simulasi Karakteristik V-I dan P-I Sistem Tanpa MPPT dan Sistem Menggunakan MPPT

Simulasi pertama adalah menguji karakteristik (V-I) dan (V-P) sistem yang tidak memakai MPPT dan sistem yang memakai MPPT terhadap karakteristik (V-I) dan (V-P) sel surya. simulasi ini dilakukan untuk mendapatkan tegangan sel surya yang optimum, tegangan ini akan dipakai untuk masukan sinyal referensi kontrol MPPT metode tegangan PV tetap. Kedua yaitu untuk mendapatkan karakteristik (V-I) dan (V-P) sisi sumber untuk sistem berupa motor dan pompa. Selanjutnya kedua karakteristik tersebut akan di plot menjadi satu gambar, sehingga diperoleh letak kerja sistem pada berbagai tingkat radiasi matahari.



**Gambar 4.1** Pemodelan sederhana seluruh sistem. (a) sistem tanpa menggunakan MPPT; (b) sistem menggunakan MPPT.

Pemodelan Sistem untuk simulasi ini yaitu pada gambar 4.1(a). Pada gambar 4.1(a) sistem terdiri atas PV, inverter, kontrol V/f, motor, dan pompa. Sistem ini tidak memakai MPPT, jadi terhubung langsung

dengan sel surya atau biasa disebut sistem pompa air konvensional. Setelah dianalisis, yang selanjutnya akan menentukan tegangan PV yang optimum. Tegangan inilah yang akan menjadi sinyal referensi untuk kontrol MPPT.

Bila sistem kontrol MPPT telah terbentuk maka selanjutnya adalah menguji sistem keseluruhan dengan memakai MPPT terlihat pada gambar 4.1(b). Sistem terdiri dari PV, DC-DC konverter, kontrol MPPT metode tegangan PV tetap, inverter, kontrol V/f, motor dan pompa.

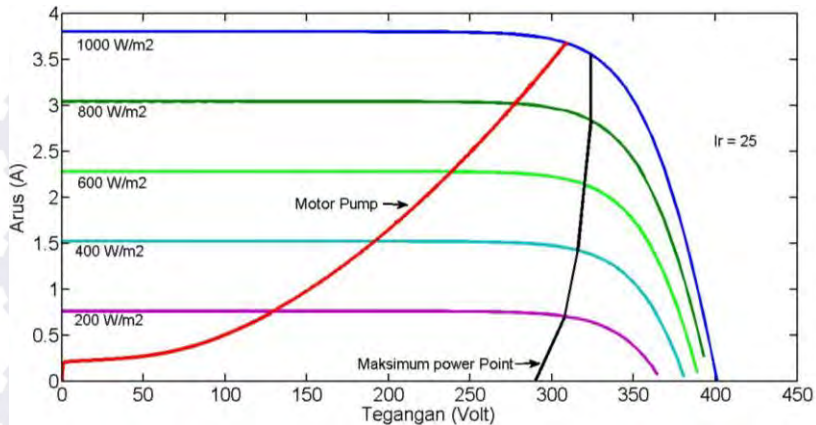
Simulasi dilakukan pada berbagai tingkat radiasi matahari dengan mengubah nilai radiasi matahari dari  $1000 \text{ W/m}^2$  hingga  $0 \text{ W/m}^2$ , dengan nilai suhu tetap  $25^\circ\text{C}$ . Semua hasil akan diplot menjadi satu antara karakteristik (V-I) dan (P-I) sel surya dengan karakteristik (V-I) dan (P-I) motor-pompa.

#### **4.1.1 Simulasi Karakteristik (V-I) dan (V-P) Sistem Tanpa MPPT**

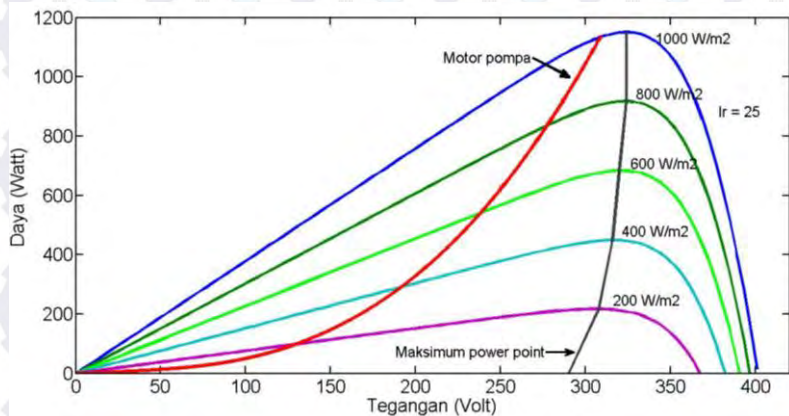
Simulasi ini dilakukan dengan menghubungkan sel surya langsung terhadap sistem inverter, V/f kontrol, motor dan pompa, tanpa menggunakan MPPT seperti gambar 4.1(a).

Pada gambar 4.2 dan 4.3 terlihat bahwa dengan menghubungkan sel surya secara langsung pada sistem tanpa MPPT akan diperoleh karakteristik (V-I) dan (V-P) yang tidak optimal, dikarenakan sel surya bekerja tidak di daya maksimal. Saat radiasi rendah sel surya bekerja jauh dari daya maksimal, sehingga efisiensi daya keluaran sel surya terhadap daya maksimum sangat rendah, terutama pada tingkat radiasi yang rendah.

Untuk mengoptimalkan daya keluaran sel surya agar maksimal diperlukan suatu komponen tambahan yaitu MPPT (*maximum power point tracking*). Sistem MPPT akan memaksa sel surya untuk bekerja optimum dengan daya keluaran yang maksimal. Atau dengan kata lain dengan menggunakan MPPT akan memaksimalkan efisiensi daya keluaran sel surya terhadap daya maksimum sel surya.



**Gambar 4.2** Karakteristik (V-I) sel surya dan motor-pompa tanpa menggunakan MPPT



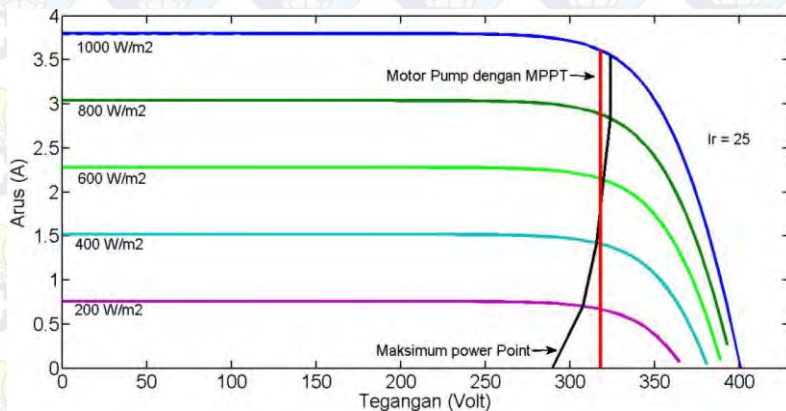
**Gambar 4.3** Karakteristik (V-P) sel surya dan motor-pompa tanpa menggunakan MPPT

Pada gambar 4.2 dan 4.3 terlihat bahwa nilai daya maksimal pada berbagai tingkat radiasi berada pada tegangan antara 300-325 Volt. Sehingga MPPT metode tegangan PV tetap bekerja pada tegangan konstan antara 300-325 Volt, sehingga dipilih 318 Volt.

#### 4.1.2 Simulasi Karakteristik (V-I) dan (V-P) Sistem Menggunakan MPPT

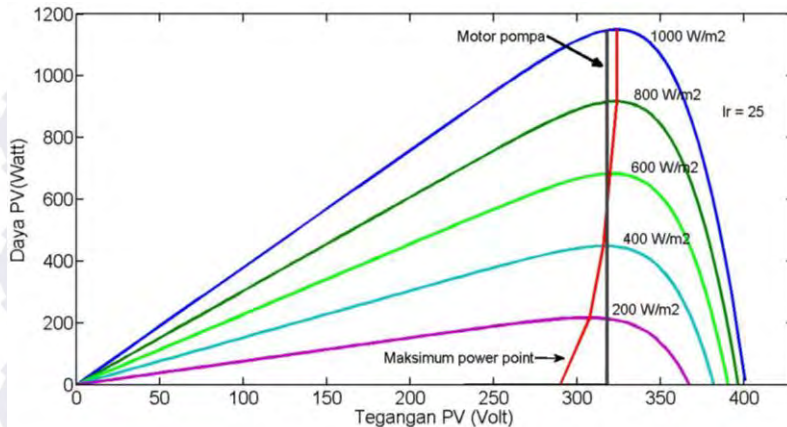
Simulasi sel surya selanjutnya adalah dengan menggunakan kontrol MPPT metode tegangan keluaran PV tetap. Setelah diperoleh nilai tegangan optimum, selanjutnya tegangan optimum tersebut akan dijadikan sinyal tegangan referensi untuk kontrol MPPT. Dari simulasi 4.1.1 diperoleh tegangan optimum referensi sebesar 318 Volt. Pada kontrol MPPT memerlukan masukan tegangan aktual sel surya dan tegangan optimum sel surya. Selisih antara tegangan aktual sel surya dan tegangan optimum masuk pada blok kontroler PI dan keluarannya adalah *duty cycle*. Nilai *duty cycle* ini akan menjadi masukan sebagai gate buck konverter, seperti terlihat pada gambar 4.1(b).

Tegangan keluaran sel surya nilainya akan selalu tetap pada nilai tegangan optimum seperti pada gambar 4.4, dikarenakan penggunaan sistem kontrol MPPT metode tegangan tetap pada sel surya ini. Sehingga daya keluaran sel surya akan selalu mendekati daya maksimal sel surya gambar 4.5. Dengan kata lain efisiensi sel surya akan selalu tinggi.



**Gambar 4.4** Karakteristik (V-I) sel surya dan motor-pompa dengan menggunakan kontrol MPPT





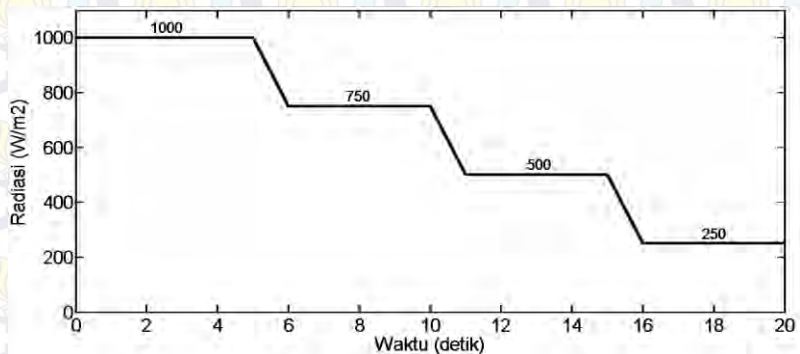
**Gambar 4.5** Karakteristik (V-P) sel surya dan motor-pompa dengan menggunakan kontrol MPPT

## 4.2 Simulasi Keseluruhan Sistem dengan Menggunakan Kontrol MPPT dan Tanpa Menggunakan Kontrol MPPT

Dalam simulasi ini dilakukan pada sistem dengan menggunakan kontrol MPPT metode tegangan PV tetap dan dengan sistem tanpa menggunakan kontrol MPPT. Simulasi ini meliputi keseluruhan sistem dengan menggabungkan semua komponen dari sel surya sampai pompa sentrifugal. Pada Gambar 4.1(b) menunjukkan pemodelan sistem dengan kontrol MPPT meliputi PV, *buck converter*, MPPT, *inverter*, kontrol V/f konstan motor induksi dan pompa sentrifugal. Pada gambar 4.1(a) menunjukkan pemodelan sistem tanpa menggunakan kontrol meliputi PV, *inverter*, kontrol V/f konstan, motor induksi dan pompa sentrifugal. Kedua simulasi dilakukan dengan melakukan perubahan terhadap intensitas cahaya matahari yang sama, sedangkan temperatur yang diberikan tetap yaitu 25°C. Waktu yang digunakan dalam simulasi sistem adalah sama sebesar 20 detik. Selanjutnya akan dicatat hasil daya keluaran PV, efisiensi daya keluaran PV terhadap daya maksimal PV, tegangan dan arus PV, tegangan keluaran Konverter DC, frekuensi motor induksi, kecepatan motor induksi, torsi motor induksi, slip motor induksi, debit dan volume air yang dikeluarkan oleh pompa. Hasil dari simulasi akan dibandingkan dan dianalisis untuk kedua sistem tersebut,

sistem dengan menggunakan kontrol MPPT atau sistem tanpa menggunakan kontrol MPPT.

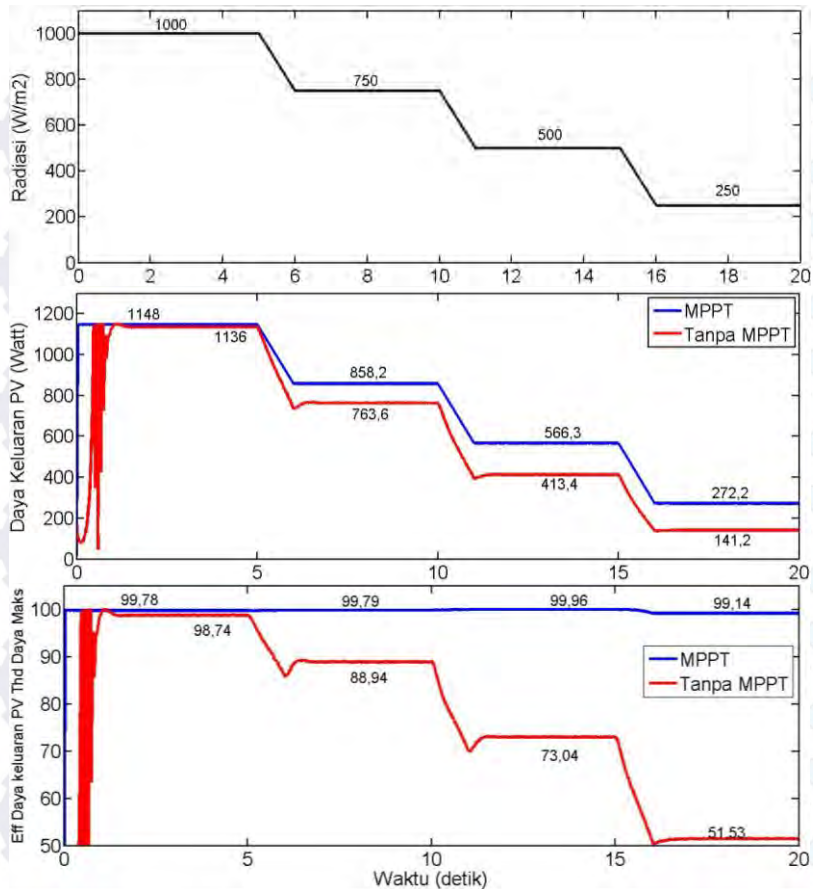
Pada Gambar 4.6 menunjukkan nilai intensitas cahaya matahari yang diberikan pada sistem. Nilai intensitas cahaya matahari yang diberikan yaitu  $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $750 \text{ W/m}^2$ ,  $500 \text{ W/m}^2$ , dan  $250 \text{ W/m}^2$ . Nilai intensitas cahaya matahari diberikan secara bertahap dengan interval waktu yang sama. Hal ini bertujuan untuk melihat respon dari sistem pada kondisi *steady*, sehingga terlihat respon perubahannya.



**Gambar 4.6** Level intensitas cahaya matahari untuk simulasi

#### 4.2.1 Hasil Simulasi Panel Surya

Spesifikasi daya untuk panel surya adalah sama dengan daya dari rating motor induksi, hal ini bertujuan untuk menghindari adanya daya yang tidak terpakai atau hilang. Jadi dengan jumlah daya yang sama, semua daya dari sel surya dapat tersalurkan dengan baik pada motor dan pompa, dengan efisiensi yang tinggi. Serta juga dapat menghemat biaya. Panel surya pada simulasi diberi temperatur yang sama pada sebesar  $25^\circ\text{C}$ .



**Gambar 4.7** Karakteristik Daya dan Efisiensi daya keluaran PV terhadap daya maksimum PV

Pada gambar 4.7 dengan menggunakan kontrol MPPT daya yang dihasilkan PV terlihat lebih besar di semua tingkat radiasi. Ini artinya bahwa dengan mengontrol *duty cycle* pada konverter DC dengan MPPT, dapat menghasilkan daya PV yang lebih besar daripada langsung terhubung ke sistem. Saat radiasi 1000 W/m<sup>2</sup> sistem dengan memakai kontrol dapat menghasilkan daya 1148 Watt, dan untuk sistem yang tidak memakai kontrol daya yang dihasilkan 1136 Watt, namun pada

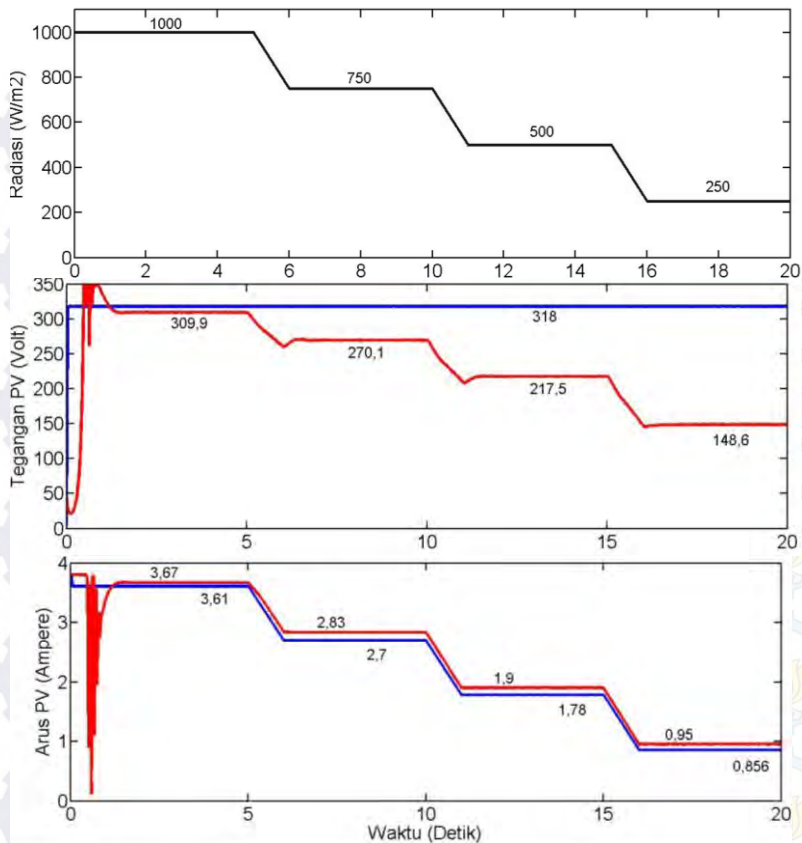
radiasi  $250 \text{ W/m}^2$  sistem dengan memakai MPPT dapat menghasilkan daya 272,2 Watt, sedangkan untuk sistem yang tidak memakai MPPT daya yang dihasilkan hanya 141,2 Watt.

Pada gambar 4.7 dengan menggunakan kontrol MPPT efisiensi daya keluaran PV terhadap daya maksimum PV terlihat lebih besar di semua tingkat radiasi. Ini artinya bahwa dengan mengontrol *duty cycle* pada konverter DC dengan MPPT, dapat menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi daripada langsung terhubung ke sistem. saat radiasi  $250 \text{ W/m}^2$  sistem dengan memakai MPPT dapat menghasilkan efisiensi 99,14%, sedangkan untuk sistem yang tidak memakai MPPT daya yang dihasilkan hanya 51,53%.

Pada gambar 4.8 terlihat pada berbagai radiasi tegangan yang menggunakan kontrol MPPT akan stabil dan konstan pada nilai 318 Volt, pada nilai tegangan ini panel surya akan bekerja pada kondisi optimum. Sedangkan yang tidak memakai kontrol MPPT akan mengalami penurunan bila radiasi matahari menurun. Jika tegangan mengalami penurunan dapat berakibat pada karakteristik PV yang tidak optimum dan daya yang dihasilkan tidak maksimal.

Hasil arus sel surya pada tingkat radiasi pada gambar 4.8, bila sistem dengan tidak menggunakan MPPT akan sedikit lebih besar dibandingkan dengan menggunakan MPPT, respon arus ini sesuai dengan karakteristik PV pada bab 3.2. namun yang jelas daya yang menggunakan MPPT akan selalu lebih besar daripada tanpa menggunakan MPPT. Perbedaan arus pada berbagai tingkat radiasi kira-kira hanya sekitar 5 hingga 15 persen. Berbeda dengan tegangan yang tingkat perbedaannya sangat jauh, sistem dengan dengan kontrol MPPT akan lebih besar daripada tidak menggunakan MPPT, terutama pada tingkat radiasi yang rendah, perbedaannya mencapai hingga 50 %.

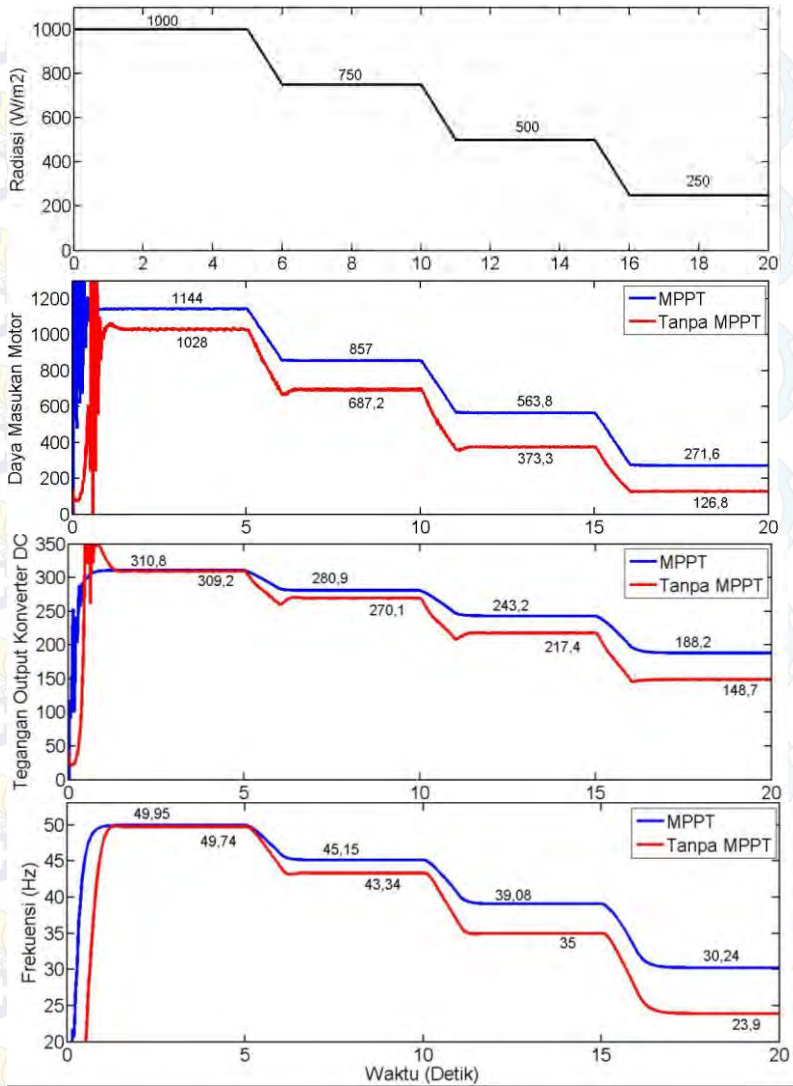




**Gambar 4.8** Karakteristik tegangan dan arus keluaran PV

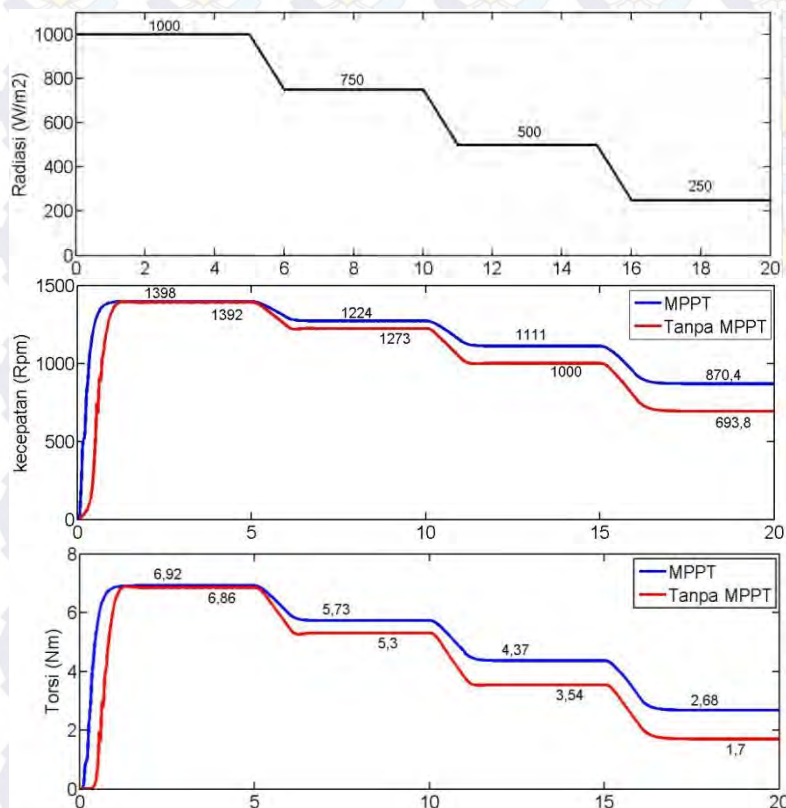
#### 4.2.2 Hasil Simulasi Motor Induksi

Pada gambar 4.9 dengan menggunakan kontrol MPPT, terlihat daya masukan motor induksi lebih besar dibandingkan tanpa menggunakan kontrol MPPT di semua tingkat radiasi matahari. Pada tingkat radiasi  $1000 \text{ W/m}^2$ , sistem dengan memakai kontrol MPPT mendapatkan daya sebesar 1144 Watt, dan untuk sistem yang tidak memakai kontrol MPPT daya yang diserap 1028 Watt, untuk radiasi  $250 \text{ W/m}^2$  Sistem dengan MPPT menyerap daya 271,6 Watt sedangkan sistem tanpa MPPT daya yang diserap 126,6 Watt. Daya tersebut juga termasuk daya keluaran inverter tiga fasa.



**Gambar 4.9** Karakteristik Daya masukan motor, tegangan keluaran Konverter DC, dan Frekuensi Motor

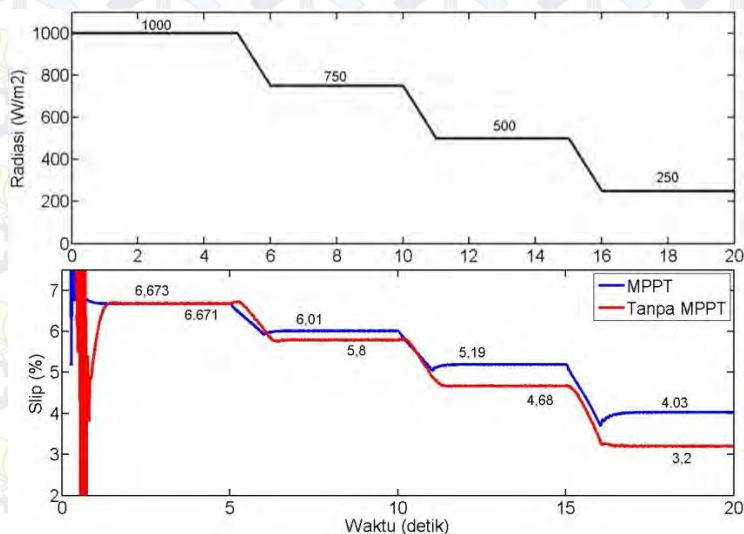
Pada gambar 4.9 dengan menggunakan kontrol MPPT, terlihat Tegangan keluaran konverter DC lebih besar dibandingkan tanpa menggunakan kontrol MPPT di semua tingkat radiasi matahari. Pada tingkat radiasi  $500 \text{ W/m}^2$ , sistem dengan memakai kontrol MPPT menghasilkan tegangan keluaran konverter DC sebesar 243,2 Volt, dan untuk sistem yang tidak memakai kontrol MPPT tegangan yang dihasilkan sebesar 126,8 Volt, hampir separuh dari tegangan dengan memakai kontrol MPPT.



**Gambar 4.10** Karakteristik Kecepatan dan Torsi Motor induksi

Frekuensi motor bila diberi MPPT juga lebih besar daripada terhubung langsung kesumber sel surya. Terlihat pada gambar 4.9 frekuensi motor akan selalu lebih besar menggunakan kontrol MPPT dibandingkan tidak menggunakan, sehingga kecepatan motor akan lebih cepat.

Pada gambar 4.10 dengan menggunakan kontrol MPPT, terlihat kecepatan motor induksi lebih besar dibandingkan tanpa menggunakan kontrol MPPT di semua tingkat radiasi matahari. Pada tingkat radiasi  $1000 \text{ W/m}^2$ , sistem dengan memakai kontrol MPPT memiliki kecepatan sebesar 1396 rpm, dan untuk sistem yang tidak memakai kontrol MPPT kecepatannya 1392 rpm, untuk radiasi  $250 \text{ W/m}^2$  Sistem dengan MPPT memiliki kecepatan 870,4 rpm sedangkan sistem tanpa MPPT kecepatannya 693,8 rpm. Untuk torsi juga berlaku hal yang sama, pada tingkat radiasi  $1000 \text{ W/m}^2$ , sistem dengan memakai kontrol MPPT memiliki torsi sebesar 6,92 Nm, dan untuk sistem yang tidak memakai kontrol MPPT torsi 6,86 Nm, untuk radiasi  $250 \text{ W/m}^2$  Sistem dengan MPPT memiliki torsi 2,68 Nm, sedangkan sistem tanpa MPPT torsi 1,7 Nm. Hasil kali antara kecepatan dan torsi adalah daya beban motor induksi, atau dalam tugas akhir ini merupakan daya masukan untuk pompa air.

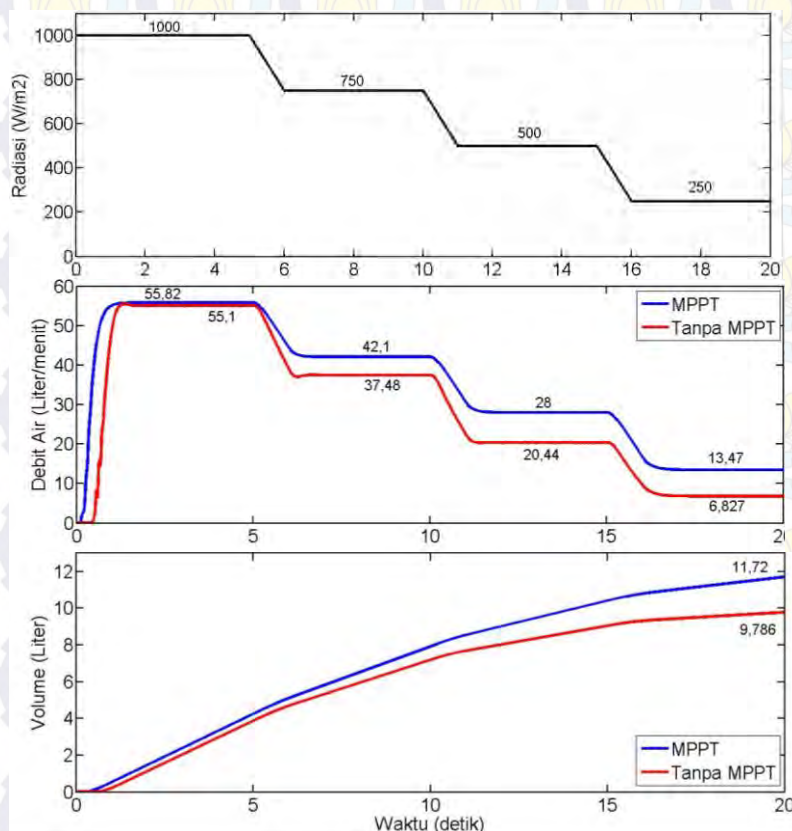


**Gambar 4.11** karakteristik Slip motor Induksi



Pada gambar 4.11 dengan menggunakan kontrol MPPT, terlihat Slip motor induksi lebih besar dibandingkan tanpa menggunakan kontrol MPPT di semua tingkat radiasi matahari. Pada tingkat radiasi  $500 \text{ W/m}^2$ , sistem dengan memakai kontrol MPPT menghasilkan slip sebesar 5,19% , dan untuk sistem yang tidak memakai kontrol MPPT slip yang ditimbulkan sebesar 4,66%.

### 4.2.3 Hasil Simulasi Pompa Air Sentrifugal



**Gambar 4.12** Karakteristik Debit air dan volume air

Pompa air sentrifugal berfungsi untuk memompa air dari satu tempat ketempat yang lain. Pompa ini di digerakkan oleh motor induksi. Jadi kecepatan debit air yang dipompa tergantung dari daya penggerak motor yaitu kecepatan dan torsi motor induksi.

Daya keluaran motor induksi yang berupa kecepatan dan torsi akan dikonversikan menjadi debit air gambar 4.12 oleh pompa sentrifugal. Dengan menggunakan kontrol MPPT terlihat debit air pada semua kondisi radiasi matahari akan lebih besar daripada tidak menggunakan kontrol MPPT. Sebagai contoh pada radiasi  $250 \text{ W/m}^2$  dengan menggunakan kontrol akan mendapatkan debit air sebesar 13,47 liter/menit sedangkan tanpa menggunakan kontrol akan menghasilkan debit air sebesar 6,827 liter/menit.

Menggunakan kontrol MPPT akan menaikkan debit air yang dipompa, begitu juga volume air yang dipompa, pasti akan lebih besar daripada tanpa menggunakan kontrol gambar 4.12, pada rentang waktu selama 20 detik dengan tingkat radiasi yang bervariasi untuk sistem pompa air sel surya menggunakan kontrol MPPT menghasilkan volume air sebesar 11,72 liter sedangkan jika tanpa menggunakan sistem kontrol MPPT volume air yang dihasilkan sebesar 9,78 liter. Air yang dipompakan dengan menggunakan kontrol MPPT akan lebih banyak sekitar 2 liter.

**Tabel 4.1** Hasil Simulasi Sistem dengan Kontrol MPPT dengan tanpa kontrol MPPT

<i>Keterangan</i>	<i>Sistem Tanpa MPPT</i>	<i>Sistem Dengan MPPT</i>
Daya rata-rata PV	521 Watt	623,75 Watt
Daya rata-rata Masukan Motor	472,4 Watt	621,4 Watt
Efisiensi Daya Keluaran PV Terhadap daya maks PV	71,8 %	98,9 %
Slip rata-rata	4,71 %	5,14 %
Kecepatan rata-rata	994 rpm	1097 rpm
Torsi rata-rata	3,84 Nm	4,46 Nm
Debit air rata-rata	24.4 liter/menit	29,57 liter/menit
Volume air	9,78 liter	11,72 liter



## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari Tugas Akhir ini, ada beberapa hal yang dapat disimpulkan, yaitu :

1. Motor induksi bila dihubungkan langsung dengan sumber sel surya, maka daya keluaran sel surya tidak optimal atau maksimal. Diperlukan suatu kontroler untuk memaksimalkan daya sel surya, yaitu salah satunya dengan cara mengontrol tegangan keluaran sel surya konstan pada nilai optimum. Dari hasil simulasi diperoleh tegangan optimal untuk sel surya sebesar 318 Volt.
2. Dengan menggunakan kontrol MPPT metode tegangan keluaran PV konstan maka diperoleh hasil yang lebih baik ketimbang tanpa menggunakan kontrol MPPT, atau terhubung langsung dengan PV. Dengan kontrol diperoleh volume air sebesar 11,72 liter, daya keluaran PV rata-rata 623,75 Watt, efisiensi rata-rata 98,9% slip rata-rata 5,14% dan debit air rata-rata 29,57 liter/menit. Sedangkan tanpa menggunakan kontrol diperoleh volume air sebesar 9,78 liter, daya keluaran PV rata-rata 521 Watt, efisiensi rata-rata 71,8% slip rata-rata 4,71% dan debit air rata-rata 24,4 liter/menit.

#### **5.2 Saran**

Saran yang dapat diberikan untuk tugas akhir ini adalah :

1. Diharapkan kedepannya dapat dilakukan penelitian MPPT metode tegangan keluaran PV konstan dengan kontrol yang lebih baik.
2. Diharapkan kedepannya dilakukan pembuatan alat, terutama untuk sistem MPPT. Karena sistem MPPT ini lebih murah dibandingkan dengan sistem MPPT yang lain.



